

ИНФОРМАЦИЯ

О XX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Греция, г. Салоники, 6—10 августа 1990 г.

Заварицкая Э. И., Ипатова И. А., Мирлин Д. Н., Мурзин В. Н.,
Пермогоров С. А., Пикус Г. Е., Сурис Р. А., Тимофеев В. Б.,
Тиходеев С. Г., Шейнкман М. К., Акимченко И. П., Вавилов В. С.

XX Международная конференция по физике полупроводников состоялась в Греции, в г. Салоники с 6 по 10 августа 1990 г. В работе конференции участвовало более 900 ученых почти из 30 стран (60 из них из Советского Союза), представивших примерно 630 докладов практически по всем основным направлениям современной физики полупроводников. Особое внимание на конференции было уделено полупроводниковым структурам — гетеропереходам, сверхрешеткам, квантовым ямам, линиям и точкам, границам раздела и поверхностям. В частности, из 8 пленарных и 208 секционных докладов этой тематике были посвящены соответственно 6 и 134 доклада.

Представленные на конференции устные и стендовые доклады были распределены по 9 секциям.

1. *Гетеропереходы и сверхрешетки:*

- а) электронная структура,
- б) Si/Ge-системы,
- в) оптические свойства, экситоны,
- г) квантовый эффект Холла,
- д) туннелирование,
- е) коллективные возбуждения, фононы,
- ж) примеси и дефекты,
- з) напряженные сверхрешетки,
- и) АII—BVI-системы,
- к) новые структуры и приборы,
- л) транспортные свойства.

2. *Поверхности и контакты:*

- а) атомная и электронная структура,
- б) адсорбция и поверхностные реакции,
- в) рост тонких пленок, эпитаксия,
- г) контакты.

3. *Квантовые линии и точки.*4. *Объемные вещества:*

- а) электронная структура, фононы,
- б) транспорт,
- в) горячие носители,
- г) мелкие примеси,
- д) глубокие примеси и дефекты,
- е) магнитные примеси,

- ж) диффузия,
 - з) оптические свойства, экситоны.
5. *Общие проблемы, фазовые переходы.*
 6. *Аморфные полупроводники.*
 7. *Физика приборов.*
 8. *Обработка.*
 9. *Новые явления и материалы.*

Отдельный пленарный симпозиум был посвящен проблемам и перспективам полупроводниковой технологии в 90-х гг.: взгляд из Европы, США и Японии. Экспоненциальный рост степени интеграции микросхем (в 4 раза каждые 3 года) продолжится и в 90-х г.; к концу столетия следует ожидать появления микросхем с емкостью 4 Гбайт/чип. Это развитие будет происходить пока на основе обычной кремниевой технологии за счет применения эксимерной лазерной и рентгеновской литографии. Однако возможно также и появление устройств, работающих на новых квантовых принципах (наноструктуры). Подчеркивалось, что основные технологические достижения будут получены в США и Японии. Европа, отставая в технологии, возможно, сохранит лидерство в фундаментальных исследованиях.

Как уже упоминалось, из 8 пленарных докладов лишь 2 были посвящены объемным свойствам — водороду в полупроводниках (Е. Халлер, США) и первопринципным расчетам не только статических свойств твердых тел, но и динамических процессов, например диффузии водорода в Si (М. Пайн, Великобритания). Вообще для расчетных работ, представленных на конференции, был характерен подход *ab initio*, который обеспечивался использованием суперкомпьютеров. В качестве примера можно привести работу, посвященную вычислению скачков валентной зоны в гетеропереходах (М. Метфессель, ФРГ).

Остальные пленарные доклады были посвящены поверхностям, границам раздела, микро- и наноструктурам. Здесь следует отметить следующее. 1) Сканирующий туннельный микроскоп применяется теперь не только для исследования реконструированных поверхностей твердых тел, но и для исследования и, главное, для воздействия на химические свойства поверхности (П. Авурис, США). Это открывает возможности для создания сверхминиатюрных устройств с атомными размерами (наноэлектроника). 2) Методы просвечивающей электронной микроскопии используются для исследования внутренних границ раздела в твердых телах с атомарным разрешением (Дж. Гибсон, США). 3) По-прежнему много внимания уделяется квантовому эффекту Холла (Дж. Эйзенштейн, Мюррей Хилл, США), пополняется семейство особенностей при дробных степенях заполнения уровней Ландау, в том числе с четным знаменателем (не объясняющимся в рамках модели Лаффлина), обсуждается возможность вигнеровской кристаллизации (при $\nu \approx 1/5.4$). Весьма перспективны с точки зрения фундаментальной и прикладной физики низкоразмерные структуры — квантовые 1D-проводники и 0-точки (Д. Хейтман, ФРГ); методами лазерной голографической литографии можно создавать 2D-массивы квантовых точек, соединенных квантовыми проводниками, т. е. искусственные аналогии твердых тел.

Из очень большого количества интересных и важных работ следовало бы выделить работы, в которых впервые наблюдался таммовский уровень на границе барьер AlAs / сверхрешетка AlGaAs—GaAs (Х. Охно, США):

— обнаружены квантовые биения в системе легких и тяжелых экситонов в AlGaAs-сверхрешетке при когерентном возбуждении (Б. Фейербахер и др., ФРГ);

— показано, что δ -легирование кремнием границы раздела GaAs/AlAs позволяет в широких пределах менять скачок валентных зон (Г. Братина и др., Италия);

— сообщается о выращивании сверхтонкой 2D-структуры на боковом склоне сверхрешетки (Д. Гершони и др., США).

Необходимо отметить прекрасную организацию работы конференции.

За ходом заседаний можно было следить по информационным дисплеям, представленным в различных местах, а также получать весьма разнообразную информацию из компьютерного банка данных. Кроме того, ежедневно издавалась специальная газета (вышло 6 выпусков). Еще одно новшество — присуждение премии за лучшую работу, выполненную молодым исследователем.

Гетероструктуры и сверхрешетки

Представленные на конференции доклады по сверхрешеткам и гетероструктурам показали, что в этой области достигнут значительный прогресс. Весьма широко представлены спектроскопические исследования систем с пониженной размерностью, в частности спектральные зависимости фотolumинесценции и комбинационного рассеяния света. Новой тенденцией в развитии оптических исследований является более широкое использование пикосекундной спектроскопии, когерентных и нелинейных оптических методов, а также значительно более простых в техническом отношении методов отражения и фотоотражения и длинноволновой ИК спектроскопии. Эти методы позволяют получить информацию не только о зонной структуре материала, но и об их кинетических характеристиках.

Отметим работы, в которых сообщается о наблюдаемых впервые эффектах. Теоретики давно предсказывали возможность локализации электронов в узкозонных материалах при приложении достаточно сильного электрического поля. В оптических спектрах линии должны сопровождаться отстоящими на равных расстояниях спутниками (эффект Ванье—Штарка). Однако многочисленные попытки обнаружить этот эффект в объемном материале успеха не имели. Эффект был обнаружен в сверхрешетках, когда удалось обеспечить в них однородное распределение электрического поля. Результаты этих работ обобщены в приглашенном докладе Е. Мендеса (США). В определенных выше условиях наблюдалась серия спутных линий, соответствующая межзонным переходам между штарковскими уровнями в валентной зоне и в зоне проводимости. По мере увеличения электрического поля происходит локализация электронов в одной яме и спутные линии исчезают, поскольку интенсивность спутников определяется степенью просачивания волновых функций соседних ям в ячейку, где локализована тяжелая дырка. Этот эффект дает возможность определить длину когерентности волновой функции электрона. В коротко периодической сверхрешетке при 4.2 К наблюдается до 17 спутников, а при комнатной температуре их число уменьшается до 9. В работе М. Школьника (Великобритания) эффект Штарка наблюдался на сверхрешетках InGaAs/GaAs, т. е. на решетках 1-го типа, у которых нижние уровни электронов Γ_c и дырок Γ_{hh} находятся в одной яме, а также на решетках 2-го типа GaAs/AlAs, у которых нижние уровни электронов X_c и дырок Γ_v находятся в разных слоях. Одновременно наблюдались переходы между уровнями Γ_v и Γ_c , локализованными в слое GaAs. В сверхрешетке InGaAs/GaAs наблюдались также переходы между уровнем легких дырок в слое GaAs и уровнем Γ_c в слое InGaAs. В ряде работ было обнаружено явление квантовых биений между электронными состояниями в квантовых ямах. В работах К. Лео (США) и Б. Фейербахера (ФРГ) эффект квантовых биений наблюдался в спектре резонансной флуоресценции. Явление возникает в результате одновременного возбуждения двух различных квантовых состояний одним фотоном двух близкорасположенных уровней. В работе К. Лео это — уровни экситонов в квантовых ямах, различающихся по толщине на одну постоянную решетки; в работе Б. Фейербахера это — уровни легкого и тяжелого экситонов. Эти уровни возбуждаются коротким импульсом света с волновым вектором K_1 (ширина спектрального пучка 2 мэВ). С задержкой на время τ подается 2-й импульс с волновым вектором K_2 с перпендикулярной поляризацией. В результате в кристалле создается решетка с $K=K_2-K_1$, на которой дифрагируют фотоны 2-го импульса, создавая волну с $K=2K_2-K_1$, что и регистрируется. При возбуждении одного уровня интенсивность сигнала спадает экспоненциально как $\exp(-2\tau/T_2)$, где T_2 — время фазовой релаксации. При одновременном возбуждении двух уровней с энергиями E_1 и E_2 на фоне экспоненциального спада наблюдаются биения на частоте $\omega=1/\hbar(E_1-E_2)$,

амплитуда которых максимальна при одинаковом возбуждении обоих уровней. Эффект указывает на когерентность возбуждаемых состояний, т. е. на наличие недиагональной компоненты матрицы плотности, а также позволяет измерить величину $E_1 - E_2$. В работе Л. Есаки (США) было показано, что с помощью метода фотолюминесценции можно детектировать поверхностные таммовские состояния, образующиеся на границах сверхрешеток.

Остановимся на результатах оптического исследования структур с квантовыми ямами. Метод фотоотражения был успешно использован в работе А. Димолауса и др. (Греция, США) для определения по величине зонных расщеплений термических напряжений, возникающих в слоях GaAs, выращенных на подложках Si. В работе Ф. Цердейра и др. (Бразилия и др.) метод фотоотражения позволил наблюдать осцилляции Франца—Келдыша в глубине собственного поглощения сверхрешеток InGaAs/GaAs, что позволило определить величину скачка зоны проводимости на гетерогранице и сделать вывод о распрстраненном характере движения электронов. Теория фотоотражения применительно к структурам разного типа была рассмотрена в работе Р. Эндерлайна (ГДР).

В работе И. Уральцева и др. (СССР) было показано, что при использовании угла падения, близкого к углу Брюстера, регистрация спектра отражения сверхрешеток может быть осуществлена и без дополнительной модуляции. Анализ линии отражения позволил проследить за изменением характера движения экситонов от двумерного к трехмерному при уменьшении периода сверхрешеток GaAs/AlGaAs.

Другим важным методом получения информации об энергетической структуре сверхрешеток является двухфотонное поглощение. Достоинством этого метода является возможность наблюдения переходов в дипольно запрещенные $2P$ -состояния экситонов, что позволяет прямо определить энергию экситонов. В работе И. Каталано и др. (Италия) были определены энергии связи экситонов и положения высоких уровней пространственного квантования в системе AlGaAs/AlAs. В работе М. Нитхизунторна и др. (Австрия и др.) методом двухфотонного поглощения исследован эффект Зеемана в структурах с квантовыми ямами GaAs/AlAs.

Появляются также работы, в которых для исследования спектра возбужденных состояний используется длинноволновое ИК поглощение. Так, в работе Р. Беэрле и др. (ФРГ) исследовано нестационарное поглощение между уровнями пространственного квантования зоны проводимости $n=1$ и $n=2$ сверхрешеток GaInAs/AlInAs в условиях импульсного возбуждения. По форме спектра поглощения установлено, что такое возбуждение вызывает перегрев электронного газа более чем на 300 К за время порядка 20 пс. В работе К. Филлипса и др. (Великобритания) методом ИК поглощения исследованы переходы между экситонными уровнями $1S$ и $2P$ в сверхрешетках GaAs/AlAs. Такой тип переходов не чувствителен к неоднородному уширению, обусловленному флуктуациями толщины слоев, что существенно повышает точность измерений. Полученные таким образом значения энергии связи экситонов хорошо согласуются с расчетом, выполненным в приближении эффективной массы. В докладе Д. Хайтмана представлены результаты исследования ИК поглощения в системах с квантовыми ямами на основе GaAs/GaAlAs с числом электронов от 20 до 200. Характер спектра интерпретируется в рамках квазиатомной модели с учетом коллективных эффектов. В этом докладе, а также в работе группы авторов во главе с М. Кодем (ФРГ) установлено, что одномерный характер экситонов в квантовых проволоках проявляется в резкой зависимости интенсивности фотолюминесценции от поляризации возбуждающего света относительно направления проволоки. При концентрации одномерных экситонов, превышающей 10^{15} см^{-3} , наблюдается резкое уменьшение времени жизни экситонов, что объясняется возникновением стимулированного излучения.

Среди довольно многочисленных работ по рассеянию света следует отметить доклад А. Пинзака (США), в котором представлены результаты исследований электронных $2D$ - и $1D$ -систем. Высокие подвижности электронов ($\mu \sim 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) в модуляционно-легированных единичных квантовых ямах обеспечивают хорошие условия для оптических исследований. В работе спе-

циальное внимание уделяется влиянию межэлектронного взаимодействия на оптические спектры. В системах с пониженной размерностью обменная и корреляционная энергии в 5—10 раз больше, чем в 3D-системах. Поэтому было естественно искать спектроскопические проявления этих эффектов. Обнаружены узкие линии с ширинами порядка 0.16 мэВ, соответствующие одночастичным возбуждениям зарядовой плотности (синглетные состояния с полным моментом $J_z=0$) и одночастичным возбуждениям спиновой плотности (триплетное состояние с $J_z=0, \pm 1$). По величине расщепления оцениваются константы обменного взаимодействия. Показано, что в локализации экситонов обменное взаимодействие также играет существенную роль.

При наличии магнитного поля исследованы возбуждения между уровнями Ландау. Так как закона сохранения импульса для таких переходов нет, то по форме спектральной линии определена дисперсия возбуждений и найдены критические токи плотности состояний. В частности, обнаружен магниторотонный минимум, предсказанный в теории Хартри—Фока.

Ряд работ был посвящен динамике колебаний решетки в квантовых ямах. Интерес представляет приглашенный доклад Е. Молиари (Италия), в котором предложен новый подход к расчету колебательных мод в квантовых ямах. Обычные динамические расчеты не объясняли некоторых наблюдаемых закономерностей, в частности зависимости пиков комбинационного рассеяния от толщин слоев, отсутствия связи мод, локализованных в ямах, с объемными модами. Экспериментально были обнаружены моды, которые не проявляли эффекта «складывания» ветвей в уменьшенной зоне Бриллюэна. Основная идея работы состоит в учете смешивания катионов на границе GaAs/GaAlAs и образования плоских дефектных плоскостей. Поскольку спектры комбинационного рассеяния света весьма чувствительны к комбинационному беспорядку, удалось установить, что связанные с этим беспорядком локализованные моды типа GaAs и AlAs смещаются в противоположные стороны, так что складывания оптических ветвей не происходит. Вместо складывания возникает так называемое плетение оптических мод. Ранее распространенное представление, что отсутствие складывания оптических мод связано с перераспределением заряда на поверхности, расчетами не подтвердилось.

Большое число работ на конференции было посвящено исследованию кинетики затухания люминесценции гетероструктур и сверхрешеток с пикосекундным разрешением по времени. Получаемая информация позволяет охарактеризовать процессы излучательной и безызлучательной рекомбинации в структурах с различными параметрами. Так, например, в работе М. Капицци и др. (Италия) на основании анализа стационарных интенсивностей и времен затухания исследованы механизмы пассивации центров безызлучательной рекомбинации в квантовых ямах GaAs/GaAlAs при гидрогенизации. В работе Б. Монемара и др. (ФРГ) исследована динамика установления теплового равновесия между свободными и связанными экситонами в системе GaAs/GaAlAs, а также определены излучательные времена для различных каналов рекомбинации.

Интересная информация о процессах релаксации энергии горячих электронов в двумерных системах была представлена в докладе Д. Мирлина (СССР). Оказалось, что исследование степени поляризации горячей люминесценции в магнитном поле позволяет получать информацию о пикосекундных процессах из результатов измерений, выполненных в непрерывном режиме. В частности, для квантовых ям GaAs/GaAlAs были измерены время рассеяния на оптических фонах, равное 0.15 пс, и время междуподзонного рассеяния, равное 0.75 пс.

Пикосекундная кинетика позволяет также получать информацию о процессах пространственной миграции энергии в системах с пониженной размерностью. В работе Г. Петера и др. (ФРГ) было обнаружено сокращение времени затухания люминесценции при уменьшении короткопериодических сверхрешеток (GaAs)/(AlAs) при одновременном уменьшении силы осциллятора оптических переходов. Сделан вывод, что наблюдаемое сокращение обусловлено усилением миграции электронов в результате образования минизон. В работе В. Рюле (ФРГ) исследовано туннелирование между квантовыми ямами в GaAs/GaAlAs. Установлено, что при соответствующем выборе параметров структур времена туннелирования могут быть менее 10 пс, что открывает перспективы

для создания приборов с высоким быстродействием. В докладе Б. Дево (Франция) представлены результаты исследования кинетики процессов захвата и релаксации в структурах с квантовыми ямами при возбуждении световым импульсом длительностью 0.5 пс. Показано, что скорость захвата носителей квантовой ямой после фотовозбуждения обычно ограничивается диффузией в барьерной области. В системе InGaAs/InP время захвата, измеренное по затуханию барьерной фотолюминесценции и синхронному возрастанию фотолюминесценции из квантовых ям, уменьшается от 3 до 1.2 пс при снижении толщины барьера от 50 до 20 нм. При охлаждении носителей внутри ямы возможен захват электронов в L -долину, что приводит к затяжке фотолюминесценции.

В самое последнее время начались интенсивные исследования динамики процессов туннелирования в гетероструктурах. Такие исследования выполняются с помощью временных измерений фотолюминесценции с пикосекундным разрешением с последующим анализом процессов как резонансного, так и нерезонансного туннелирования (У. Шафф, США). Измерения показывают, что значения времен туннелирования превосходят их теоретические значения, что, по-видимому, обусловлено процессами рассеяния.

Остановимся на нескольких наиболее интересных работах, имеющих прикладное значение. Интерес к сверхрешеткам на основе твердых растворов Ge—Si возник уже много лет назад в связи с перспективой изготовления инжекционных излучательных приборов. Периодические структуры с определенными правилами чередования слоев Ge и Si могут обладать «прямой» зонной структурой и, следовательно, обеспечивать возможность эффективной излучательной рекомбинации. К числу докладов, экспериментально подтверждающих этот эффект, относится доклад И. Нортрапа (США), в котором делается вывод, что наблюдаемая люминесценция в таких структурах может быть обусловлена не только прямыми междузонными переходами, но и излучательной рекомбинацией в тонких буферных слоях, отделяющих сверхрешетку от подложки кремния. Большое внимание на конференции было уделено сверхрешеткам и гетероструктурам с напряженными слоями. Дело в том, что упругие напряжения большой величины приводят к сильной перестройке дырочного спектра и представляют собой дополнительный инструмент «инъекции волновых функций». В частности, в напряженных слоях за счет расщепления энергии можно добиться того, что легкие дырки будут иметь энергию, меньшую, чем тяжелые. Это открывает заманчивую перспективу создания полевых транзисторов на легких и, следовательно, «быстрых» дырках, а значит, комплиментарных интегральных схем на основе соединений $A^{III}B^V$. В частности, в докладе Ж. Бахера (ФРГ) исследование экситонного переноса в напряженных слоях InGaAs/GaAs показало, что подвижность дырок достигает величины 10^5 см²/В·с. Заслуживают упоминания и доклады о магнитоэлектрических явлениях в латеральных сверхрешетках. Такие сверхрешетки были изготовлены в США на основе гетероструктур с модуляционным легированием с помощью нанесения на них образующей барьер Шоттки металлической решетки, период которой составляет 200 нм, а ширина полосы — 60 нм. В частности, при $T=50$ мК на таких структурах был продемонстрирован эффект «кулоновской блокады» при одноэлектронном туннелировании между квантовыми точками. На конференции были представлены доклады, посвященные исследованию примесей в сверхрешетках и гетероструктурах. Поскольку энергия связи электронов на примесных центрах из-за взаимодействия с гетеробарьером должна сильно зависеть от позиции центра в квантовой яме, изучение примесных спектров позволяет определять пространственное распределение примесей в сверхрешетках и гетероструктурах. Обсуждению этого круга вопросов был посвящен доклад Б. Мак Комба (США). В докладе Ф. Капассо (США) обсуждались электрические эффекты в некоторых приборных структурах, основанных на квантовых эффектах в сверхрешетках и гетероструктурах. В частности, здесь речь шла о транзисторной структуре, в коллекторной области которой была помещена сверхрешетка. Исследованию этой структуры был посвящен доклад Ф. Белтрама (США), в котором показано прекрасное согласие полученных результатов теоретической картины проводимости в условиях квантования Ванье—Штарка. Важно подчеркнуть, что использованная транзисторная структура в отличие от диодной позволяет не-

зависимо друг от друга меняя энергию налетающих на сверхрешетку электронов и электрическое поле в сверхрешетке.

В этом же разделе следует рассмотреть доклады, посвященные квантовому эффекту Холла.

В центре обсуждения энергетического спектра двумерных электронных систем, помещенных в сильное магнитное поле, самым актуальным является вопрос об энергии основного состояния взаимодействующих электронов в квантовом пределе (когда фактор заполнения квантового состояния $\nu < 1$). Установлено, что такими состояниями при $\nu \leq 1$ являются состояния несжимаемой ферми-жидкости, которые обнаруживаются по дробному квантованию холловского сопротивления. В ультратонком пределе ($\nu \ll 1$) ожидается, что в системе взаимодействующих электронов должен возникнуть дальний порядок и должна произойти так называемая вигнеровская кристаллизация. Новизна подходов, проявившаяся в работах, представленных на конференции, состоит в том, что в режиме целочисленного дробного квантового эффекта Холла (КЭХ) удалось реализовать спектроскопические методы и обнаружить четкую корреляцию магнитотранспортных осциллирующих свойств (например, шубниковских осцилляций магнитосопротивления) со спектроскопическими свойствами (в частности, квантовыми осцилляциями интенсивности рекомбинационного излучения, шириной линий рекомбинации, периодическими скачками спектрального положения линий рекомбинации, которые связаны с разрывами химического потенциала). Такой спектроскопический подход был представлен в докладах А. Терберфилда (Великобритания) по оптическому детектированию целочисленного и дробного КЭХ при милликельвиновых температурах, Б. Голдберга (США) по оптическому детектированию КЭХ с определением энергетического плато, спектрального расщепления и осцилляций интенсивности, а также в докладе Х. Баумана и др. (Франция, СССР), посвященного магнитоспектроскопии несжимаемой ферми-жидкости $2D$ -электронов в одиночном GaAs гетеропереходе. Эти исследования позволили впервые в рамках спектроскопического метода наблюдать скачки химического потенциала при вариации концентрации вблизи дробного заполнения квантовых состояний. Отсюда непосредственно определены кулоновские щели, отделяющие основное состояние сильно скоррелированной несжимаемой ферми-жидкости от спектра одночастичных возбуждений с дробными зарядами. Существенно, что состояния несжимаемой ферми-жидкости наблюдаются вплоть до факторов заполнения $\nu=1/9$, что само по себе является рекордным на сегодняшний день наблюдением. Далее с помощью спектроскопической методики (И. Кукушкин, СССР) и магнитотранспортной методики в режиме переменного и постоянного тока (В. Гольдман, США) показано, что в электронных $2D$ -системах, помещенных в сильное поперечное магнитное поле, при факторах заполнения $\nu < 0.3$ и температурах $T < 1$ К возникает вигнеровская кристаллизация, которая в реальных системах с беспорядком сопровождается сильным циннигом кристаллов на неоднородностях случайного потенциала. Эти наблюдения являются несомненным достижением в области физики низкоразмерных систем.

Поверхность и границы раздела

Исследования поверхности неизменно вызывают повышенный интерес, поскольку происходящие на ней сложные и многообразные процессы определяют динамику роста эпителов и дальнейшую судьбу выращенных МЛЭ структур и созданных на их основе приборов.

Конференция открылась докладом Ф. Авориса (США), продемонстрировавшим, что STM-техника сканирующей туннельной микроскопии в настоящее время достигла уровня атомного разрешения. На примере стабильной реконструированной поверхности Si (111) 7×7 были показаны возможности STM, в решении вопросов электронной структуры и химии поверхности на атомном уровне: изучены процессы слабой перестройки поверхности Si (под влиянием кислорода, воды, аммиака), а также глобальные изменения, приводящие к уничтожению первоначальной структуры (под влиянием адсорбции бор- и фосфорсодержащих соединений).

В настоящее время обнаружено, что STM — не только метод изучения свойств поверхности, но и средство активного воздействия на нее. Установлено, что туннелирующие электроны и сильные электрические поля в окрестности иглы могут вызвать десорбцию адсорбированного атома и привести к восстановлению локальной реактивности.

Самый новый аспект в применении метода STM для исследований локализованных химических структур на поверхности — с помощью туннельных ВАХ характеристик (в частности, с отрицательным дифференциальным сопротивлением) на площади атомного размера ~ 1 нм. Дальнейшие успехи в этой области обещают реализацию приборов атомного размера.

В пленарном докладе Дж. Гибсона (США) показано, что метод ТЕМ просвечивающей электронной микроскопии также достиг уровня атомного разрешения и позволяет изучать в настоящее время структуру химических связей не только на идеально гладких поверхностях, но и на довольно шероховатых границах раздела.

В приглашенном докладе Б. Бигельсена (США) освещены свойства поверхностей GaAs (111), (110) и (100), изученные методом STM. Поверхности (100) и (111) были выращены методом МЛЭ и позволяли варьировать поверхностную стехиометрию во всей области — от сильно обогащенной Ga-фазы до сильно обогащенной As-фазы. Впервые обнаружен доминирующий фактор, обеспечивающий реконструкцию поверхностей GaAs (все структуры оказались реконструированными в соответствии с принципом «автокомпенсации»). Расчеты полной энергии подтвердили минимизацию энергии в этой схеме.

Приглашенный доклад Е. Каксираса (США) был посвящен важнейшему вопросу — пассивации полупроводниковых поверхностей путем адсорбции посторонних атомов. (Ранее были изучены случаи, когда величина ковалентного радиуса адсорбируемого атома была близка к соответствующей величине радиуса атома подложки). В настоящее время большой интерес вызывают системы с большим ковалентным радиусом адсорбированного атома. Установлено, что такие атомы, как Sb на Si (111), образуют верхний слой, связанный сильными связями и с подложкой, и друг с другом. Это дает возможность изготовить стабильные δ -структуры.

Интересная и важная информация была сообщена и в оригинальных докладах на Секциях. Особый интерес был проявлен к свойствам грани (100). Было обнаружено следующее.

1) Сера на Ge (100) представляет собой пока единственный пример создания структуры 1×1 . При расчетах из первого принципа выяснена электронная структура и предсказано существование новой валентной зоны (bridge bond band), еще не обнаруженной экспериментально.

2) Адсорбция молекул O_2 на поверхности Si (100) изучена теоретически (ab-initio calculation) и показано, что O_2 нестабильна из-за перехода на нее кислорода с оборванной связи; атом кислорода адсорбируется на поверхности «мостиком», связывая два верхних слоя Si, в результате образуется структура, близкая к α -кварцу.

Установлено, что Si (100) реконструируется с образованием асимметричных димеров, в то время как адсорбаты образуют картину симметричных димеров.

Одной из лучших на конференции была признана работа М. Ногуши (Япония), в которой впервые обнаружен двумерный проводящий слой (с концентрацией электронов $n \sim 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$), возникающий на чистой поверхности InAs (100) в процессе эпитаксии в условиях стабилизации поверхности мышьяком.

Объемные вещества

Физика горячих электронов представлена в работах, которые могут быть условно отнесены к трем направлениям, отражающим положение в этой области науки: горячие носители с сильно деформированными функциями распределения, нелинейная динамика и хаотизация колебаний, баллистический транспорт и туннельные явления в слоистых структурах и сверхрешетках.

Исследования горячих носителей с сильно деформированными функциями распределения — новая область физики, получившая интенсивное развитие в последние годы и приведшая к созданию нового класса твердотельных кван-

товых генераторов субмиллиметрового диапазона. В достаточно чистых полупроводниках при низких температурах, т. е. в условиях подавления основных механизмов рассеяния, динамика движения горячих носителей в кристалле начинает определяться внешними электрическими и магнитными полями («динамический разогрев»), что при наличии порогового интенсивного рассеяния на оптических фононах ($\varepsilon \geq \hbar\omega_0$) приводит к сильной деформации распределения горячих носителей в квазиимпульсном пространстве. С этим связан целый круг новых явлений, в том числе возникновение инвертированных распределений и лазерной генерации излучения в системе горячих дырок в кристаллах типа германия. В приглашенном докладе В. Мурзина (СССР) рассмотрен весьма необычный для физики горячих носителей круг явлений, обусловленных квантовыми эффектами, роль которых в указанных процессах резко возрастает. Показано, что в полупроводниках с вырожденными зонами типа p -Ge, на которых получена генерация, квантуящее действие полей не только приводит к дискретности в спектрах излучения, но и кардинальным образом изменяет динамику движения носителей и всю картину явлений, ответственных за формирование инвертированных распределений и лазерную генерацию. Проведенные спектральные исследования в полях различной кристаллографической ориентации согласуются с результатами квантовых расчетов энергетического спектра и времени жизни носителей на различных уровнях Ландау в p -Ge ($\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$), выполненных с учетом вырождения и перемешивания волновых функций легких и тяжелых дырок с одинаковой полной энергией. Созданные на этой основе перестраиваемые субмиллиметровые лазеры на циклотронных переходах в p -Ge обеспечивают плавную перестройку частоты генерации монохроматического ($\delta\gamma < < 0.1 \text{ см}^{-1}$) излучения в широких пределах длин волн 100—400 мкм (длительность импульсов 10^{-6} с, частота повторения — десятки герц) при мощности излучения в десятки милливольт. В работах В. Гавриленко (СССР) и К. Крейсера (Австрия) обсуждаются результаты исследований в условиях одноосной деформации p -Ge кристалла, приводящей к перестройке энергетического спектра, изменению процессов рассеяния носителей, интенсивности в области генерации в масштабе \mathbf{E} и \mathbf{H} полей при давлениях $P \geq 0.3$ бар. Еще более интересный результат получен И. Алтуховым и др. (СССР), которые наблюдали стимулированное длинноволновое ИК излучение на межподзонных дырочных переходах в p -Ge (10^{14} см^{-3}) при одноосном сжатии $\mathbf{P} \parallel \mathbf{E} \parallel (111)$ даже в отсутствие магнитного поля (при $P \geq 7$ кбар). Эти исследования представляют особенный интерес, в частности, потому, что во всех случаях эффекты связаны с изменением величины эффективной массы носителей (дырок), определяющей динамику их движения во внешних полях.

Проблема нелинейных свойств горячей плазмы, с которыми связаны возникновение макроскопических осцилляций и хаотизация колебаний в неустойчивых сильно неравновесных системах, продолжает занимать важное место в физике горячих электронов. В работах Й. Пейнке (ФРГ) и Ж. Хюппера (ФРГ) не только детально прослежен экспериментально переход осцилляций в хаотическую фазу (примесный пробой в p -Ge и др.), но и показана возможность теоретического описания с высокой точностью всех стадий этого перехода на основе нелинейных динамических уравнений.

Значительное внимание на конференции было уделено свойствам, физической природе и теоретическому описанию глубоких центров в различных полупроводниках. Как известно, наибольший интерес в последнее время привлекают метастабильные центры, а среди них — так называемые $EL2$ -центры в GaAs и DX -центры в GaAlAs. В обоих случаях остаются не выясненными до сих пор природа центров, их атомная модель, хотя свойства центров изучены достаточно широко, а в последнее время развита и адекватная теория, позволившая в рамках простых моделей понять механизм их метастабильности. В посвященном $EL2$ -центрам приглашенном докладе И. Шпета (ФРГ) было проведено сравнение различных магнитоспектроскопических свойств (ЭПР, оптически детектируемый двойной электронно-ядерный резонанс, магнитоциркулярный дихроизм) $EL2$ -центров и антиструктурных дефектов As_{Ga} , образованных электронной бомбардировкой GaAs. Автор делает вывод, что $EL2$ -центр не является изолированным дефектом As_{Ga} , а представляет собой сложный комплекс. В докладе

В. Кущко и др. (ПНР) было представлено спектроскопическое доказательство того, что оптический переход $EL2$ -центра из стабильного состояния в метастабильное происходит через возбужденный локализованный уровень, находящийся в резонансе с зоной проводимости, а эффективность (выход) такого перехода не превышает нескольких процентов. $EL2$ -центры образуют некоторое семейство, что было известно ранее из сопоставления данных оптических, магнито- и пьезоспектроскопических исследований. И. Буянова и др. (СССР) привели доказательства того, что существует семейство люминесцентных метастабильных $E12$ -центров наряду со стабильными, и определили их оптическую аннотропию.

Несколько лет назад М. Шеффлер и Я. Дабровский (ФРГ) провели расчет, показавший, что даже изолированный антиструктурный дефект As_{Ga} будет демонстрировать основные свойства $EL2$ -центра. Оставалось непонятным, однако, почему подобные метастабильные свойства в $GaAs$ и InP не проявляют другие аннионные антиструктурные дефекты. Более точные расчеты, выполненные указанными авторами совместно с М. Калдасом и А. Фаццио (Бразилия) и представленные в докладе на конференции, достаточно убедительно прояснили ситуацию.

Наиболее ярким в этой проблеме представляется результат, доложенный группой польских авторов (М. Беми и др., Польша). Используя гидростатическое давление (до 1 ГПа) при низкой температуре ($T < 60$ К), авторы «выдавили» метастабильный уровень ($EL2^*$), который при обычном давлении находится в резонансе с s -зоной, в запрещенную зону, тем самым открыв возможность его прямого экспериментального изучения. Они обнаружили также, что этот уровень является акцепторным и может захватить еще один электрон.

Большая группа докладов была посвящена свойствам и природе DX -центров. Предложенная несколько лет назад Чангом и Чади (США) модель DX -центров, основанная на проведенных ими теоретических расчетах, предсказывает зарядовое состояние этих центров. Это должны быть центры с так называемой отрицательной корреляционной энергией (U -минус центры DX^-). Последнее недавно являлось предметом интенсивных дискуссий; вопрос, однако, можно считать уже практически решенным. В двух представленных на конференции докладах приводились различные доказательства того, что DX -центры действительно U -минус центры: в докладе Т. Фуджисава и др. (Япония) этот вывод был сделан на основании опытов по гидростатическому давлению, а в работе М. Фокеле и др. (ФРГ) — на основании магнитооптических исследований. Существенную информацию о природе DX -центров дали исследования большой группы американских (П. Муни и др.) и испанских (Е. Колледже и др.) авторов, [оказавших, что изменение состава сплава $GaAlAs$, а следовательно, и состава окружающих DX -центры атомов влияет на энергетическое положение DX -уровней в запрещенной зоне. Столь же важный результат получен группой польских и французских авторов (Б. Кутурье и др.), показавших, что поведение DX -уровней не может быть полностью объяснено только лишь зонной структурой кристалла, как это полагали ранее. Отметим также интересный теоретический результат, представленный в докладе Е. Ямагучи и др. (Япония), состоящий в том, что предложенная Чади и Чангом модель DX -центра (атом кремния в узле решетки с оборванной связью с одним из ближайших соседей) дает не основное, как ранее полагалось, а метастабильное состояние.

Следует указать и на весьма важный теоретический результат, полученный П. Блехлем и С. Пантелидесом (США) относительно атомной структуры и концентрации междоузельных атомов кремния в кремнии. Используя современные методы расчета, авторы показали, что междоузельный атом в действительности образует комплекс из четырех ближайших атомов с существенно перестроенными связями, в которых три атома имеют по четыре связи на атом, а один — две оборванные связи. Окружающие атомы испытывают заметное смещение. Оказалось, что такой междоузельный атом образует два донорных и два акцепторных уровня в запрещенной зоне. Концентрация таких центров при 1000 °С должна достигать 10^{11} см⁻³. Результат этой работы существен, очевидно, не только для физики кремния в целом, но и для технологии полупроводникового приборостроения.

К этому же разделу можно, пожалуй, отнести и работы, касающиеся исследований процесса роста и свойств алмазных пленок — перспективного для микроэлектроники материала при управляемых электрических характеристиках. Три доклада были посвящены вопросам роста алмазных пленок, возможностям управления свойствами алмаза введением электрически активных примесей и физике поверхности алмаза. Т. Мустакас (США) высказал интересное соображение о роли вакансий в процессе выстраивания алмазной (углеродной) решетки при росте алмазных пленок из плазмы, содержащей атомы С и атомарный Н, когда возможны и параллельные процессы возникновения других модификаций углерода в твердой фазе. Новые данные теоретических расчетов природы донорных центров приведены в докладе Е. Бернхольца и его коллег (США). В предыдущих работах Бернхольц предсказывал, что введение значительных количеств донорных или акцепторных центров во время роста алмазных пленок приведет к большему совершенству их структуры вследствие увеличения скорости самодиффузии, что было подтверждено экспериментально. В докладе было обращено особое внимание на необходимость решения проблемы легирования алмаза донорными центрами с мелкими энергетическими уровнями. Было указано на то, что существующие экспериментальные данные о роли примеси междуузельного лития как донора (ФИ АН СССР) подтверждены новыми квантово-химическими расчетами автора на «сверхячейках» из 64 атомов. Методы расчета зонной структуры и равновесных положений примеси и окружающих атомов С были применены также для атомов Na (междуузельных) и Р (замещающих). Согласно расчетам, атомы Р «предпочитают» положения в узлах решетки, а атомы Li и Na — междуузельные положения. Положительные уровни у всех примесей — мелкие, например 0.1 эВ для Li и 0.3 эВ для Na. Однако растворимость этих примесей невелика, в связи с чем введение их методом термической диффузии практически невозможно. Поэтому для легирования следует применять кинетический захват в процессе роста алмаза или ионную имплантацию. Ионная имплантация особенно подходит для внедрения междуузельных примесей (Li, Na), так как нет необходимости заполнять этими примесями узлы решетки. Учитывая устойчивость атомов примеси в их положениях в кристалле, следует ожидать, что атомы Р могут диффундировать лишь по вакансионному механизму, т. е. энергия активации диффузии должна быть очень высокой и близкой к энергии активации самодиффузии. Для Li и Na эти энергии для диффузии по междуузельным каналам должны составлять около 0.85 и 1.6 эВ соответственно. Из этого следует, что атомы Li должны быть неподвижны даже при комнатной температуре. Однако, согласно эксперименту, Li остается на месте и при высоких температурах. Поэтому естественно предположить, что донорам соответствуют не просто междуузельные атомы Li, а некие комплексы с достаточно большой энергией связи. Из расчетов Бернхольца следует, что натриевые доноры должны быть сравнительно устойчивыми, что пока это не проверено экспериментально. Атомы азота находятся в узлах решетки углерода, причем имеет место искажение, выражающееся в смещении атома N в направлении (111) и смещении соседнего атома С в противоположную сторону. Это обусловлено взаимодействием электронной оболочки атома N с гибридным состоянием электронов атома С, находящегося на оси (111) от атома N. Одиночный электрон, связанный с центром, находится на антисвязывающей орбитали, образуемой гибридным состоянием атома С и парой электронов атома N. Волновая функция связанного электрона имеет максимальное значение вблизи атома С. Автор считает, что его интерпретация соответствует давно полученным экспериментальным данным о спектрах ЭПР для алмаза, содержащего атомарный азот. Работа М. Педерсона (США) содержит итоги теоретических расчетов характера связей простых органических радикалов с поверхностью алмаза.

Получена 4.04.1991
Принята к печати 8.04.1991