

РАЗОГРЕВ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ СТРИМЕРНОМ РАЗРЯДЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Диджюлис А. А., Шатковский Е. В.

Исследованы спектры рекомбинационного излучения монокристаллов сульфида кадмия при возбуждении стримерным разрядом при комнатной температуре. Показано, что коротковолновые участки спектров экспоненциальны и расширены в области высоких энергий, что свидетельствует о разогреве электронно-дырочной плазмы (ЭДП) стримерного разряда. Определена температура ЭДП в сульфиде кадмия $T_e \approx 470$ К. Показано, что температура кристаллической решетки значительно ниже температуры ЭДП.

Свечение электронно-дырочной плазмы при стримерном возбуждении полупроводников привлекает внимание исследователей. Интерес к этому явлению обусловлен, во-первых, физикой процессов при стримерном разряде, которая до сих пор остается недостаточно ясной [1-3], и, во-вторых, весьма привлекательной перспективой использования стримерных разрядов в устройствах квантовой электроники [2, 4-6]. Локальная напряженность электрического поля перед головкой стримера составляет величину $\sim 10^7$ В/см [2, 3]. Считается, что в результате туннельного эффекта и (или) ударной ионизации это поле вызывает возбуждение электронно-дырочной плазмы (ЭДП) плотностью до $10^{19} - 10^{20}$ см $^{-3}$ [2]. С другой стороны, известно, что в полупроводниках, помещенных в достаточно сильное электрическое поле, происходят существенное нарушение термодинамического равновесия в обмене импульсом и энергией между кристаллической решеткой и свободными носителями заряда и увеличение средней энергии последних [7, 8]. Тем не менее вопрос о разогреве ЭДП стримерного разряда практически не изучался. В работе [2] упоминается о разогреве в связи с возможностью лазерного излучения. Сделано качественное заключение, что разность между электронной температурой T_e и температурой решетки по порядку величины не превышает температуры решетки. Более подробные исследования разогрева стримерной ЭДП в литературе отсутствуют. Информацию о разогреве можно почерпнуть из анализа рекомбинационного излучения ЭДП [9, 10]. Однако стримерное излучение из полупроводников наблюдалось, как правило, в относительно узкой спектральной области вблизи максимума излучения [3, 11]. Коротковолновый край спектров, отражающий энергетические характеристики ЭДП, не исследовался.

С целью наблюдения разогрева и определения температуры ЭДП, создаваемой в полупроводниках стримерным разрядом, в данной работе исследованы коротковолновые участки спектра стримерного излучения сульфида кадмия с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^9$ Ом·см. Образцы, вырезанные в виде плоскопараллельных пластин перпендикулярно главной оптической оси кристалла, были отполированы с обеих сторон и имели толщину от 1 до 0.25 мм. При измерениях они помещались в диффузионное масло ВМ-4 или в ацетон. Стримерные разряды возбуждались импульсами напряжения в 20-40 кВ длительностью ≈ 50 нс, подводимыми к образцу через промежуток 0.2-0.3 мм с помощью игольчатого электрода. Излучение стримерного разряда наблюдалось как на просвет через толщину образцов, так и с возбуждаемой поверхности (со стороны электрода). Спектр излучения анализировался с помощью монохроматора МДР-3. Регистрация осуществлялась фотоумножителем ФЭУ-106

и осциллографом С1-70. Неравномерность спектральной характеристики фотомножителя учитывалась при обработке результатов. Измерения выполнены при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены спектры стримерного излучения, как прошедшего на просвет через пластины сульфида кадмия различной толщины (кривые 3—6), так и наблюдаемого со стороны возбуждающего электрода (кривые 1, 2). Для удобства сравнения спектральные кривые произвольно смещены друг относительно друга по вертикали. Как и в работах [11, 3], положение максимума спектральных кривых сдвинуто в длинноволновую область по сравнению со спектром фотолюминесценции [11, 12]. Величина сдвига несколько возрастает с увеличением толщины пластинки. Одновременно максимум становится более пологим. Минимальный сдвиг наблюдается для спектра, снятого со стороны электрода. Наряду с этим наблюдается другая характерная особенность: спектр стримерного излучения значительно расширен в коротковолново-

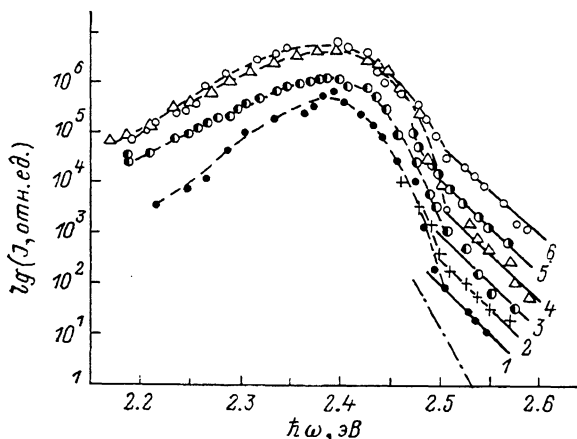


Рис. 1. Спектры стримерного свечения CdS, наблюдаемого со стороны возбуждаемой поверхности (1, 2) и прошедшего через кристалл (3—6).

Толщина кристалла, мм: 3 — 0.25, 4 — 0.5, 5 — 0.75, 6 — 1. Штрихпунктирная линия — коротковолновый участок спектра, соответствующий температуре ЭДП 293 К.

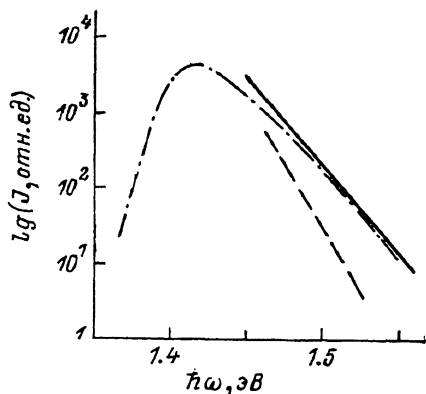


Рис. 2. Спектр стримерного свечения GaAs.

Штрихпунктирная линия — экспериментальные результаты [13], штриховая — экспонента, соответствующая температуре ЭДП 300 К.

ую сторону по сравнению со спектром фотолюминесценции при слабом возбуждении. В этом отношении он напоминает спектр фотолюминесценции при интенсивном лазерном возбуждении [13]. Форма коротковолнового края хорошо укладывается на экспоненциальную зависимость, изображенную на рис. 1 сплошными прямыми. При этом показатель экспоненты одинаков для всех спектральных кривых независимо от того, прошло излучение через пластинки кристалла разной толщины или нет.

Как известно, деформация спектра стримерного излучения по сравнению со спектром фотолюминесценции в значительной мере обусловлена поглощением в образце [3, 11]. Однако нельзя упускать из виду того, что сравнимую долю в смещение положения максимума должно вносить и сужение запрещенной зоны за счет обменного и корреляционного взаимодействия в ЭДП [2, 14, 15]. Поэтому вклад поглощения несколько меньше, чем следует из сравнения спектров стримерной люминесценции и фотолюминесценции. Что касается коротковолнового края спектра излучения, то, как показывают результаты работы [12], поглощение практически не сказывается на его форме. Причина заключается в том, что в этой спектральной области коэффициент поглощения в сульфиде кадмия почти постоянен [16], и поэтому коротковолновый край рекомбинационного излучения подавляется поглощением практически равномерно без искажения формы. Этим можно объяснить экспериментально наблюдаемый нами факт, что форма коротковолнового края спектра стримерного излучения сульфида кадмия не зависит от вариации указанных выше условий наблюдения.

При установившемся больцмановском распределении по энергии коротковолновый участок спектра в случае междузонных прямых переходов описывается выражением $J(\hbar\omega) \sim (\hbar\omega)^2 \exp[-(\hbar\omega - E_g)/kT_e]$, где $\hbar\omega$ — энергия кванта излучения, E_g — ширина запрещенной зоны, T_e — температура излучающей системы частиц [17, 9, 10]. Следовательно, экспоненциальная форма коротковолнового участка спектра стримерного излучения указывает на установление больцмановского квазиравновесия в ЭДП стримерного разряда. Это согласуется с оценкой концентрации ЭДП Δn в головке стримера. Как указывалось, $\Delta n \sim 10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что превышает критическое значение концентрации $\Delta n_c \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$, необходимое для установления больцмановского распределения по энергиям в полупроводниках типа сульфида кадмия [8-10]. Таким образом, наклон экспоненциальной зависимости коротковолновых участков спектра отражает температуру ЭДП стримерного разряда в сульфиде кадмия. На рис. 1 штрихпунктиром нанесен наклон коротковолнового участка спектра, соответствующий температуре эксперимента 293 К. Как видно на рис. 1, наклон коротковолновых участков спектров стримерного излучения более пологий, что является свидетельством разогрева ЭДП. Температура ЭДП, определенная согласно приведенной выше формуле, равна 470 К.

Аналогичная картина наблюдается и для стримерного излучения из высокоомного арсенида галлия. На рис. 2 в полулогарифмическом масштабе изображен спектр стримерного свечения арсенида галлия при комнатной температуре [18]. Форма края, соответствующая температуре решетки $T_0 = 300 \text{ К}$, показана штриховой линией. Как и в предыдущем случае, коротковолновый участок экспоненциален и расширен в сторону больших энергий, что, по-видимому, также свидетельствует о разогреве излучающей ЭДП. Оценка температуры дает значение $T_e \approx 530 \text{ К}$.

Полученные экспериментальные результаты позволяют предполагать, что найденное значение температуры характеризует ЭДП стримерного разряда, в то время как кристаллическая решетка в области прохождения треков стримера остается холодной. Действительно, при нагреве кристаллической решетки наблюдается температурное сужение запрещенной зоны. Температурный коэффициент ширины запрещенной зоны в сульфиде кадмия равен $4.4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ [19]. Следовательно, при изменении температуры кристаллической решетки на 177 К сужение запрещенной зоны должно составить $\approx 78 \text{ мэВ}$. На такое энергетическое расстояние должен был бы сместиться и спектр излучения по сравнению с фотолуминесценцией. С учетом поглощения в образце и перенормировки запрещенной зоны сдвиг должен быть еще больше. Однако экспериментально наблюдаемый сдвиг спектра излучения составляет всего $\approx 40 \text{ мэВ}$, что на 38 мэВ меньше приведенной оценки. Это позволяет утверждать, что кристаллическая решетка, видимо, практически не греется, а определенная нами температура характеризует только состояние ЭДП. Косвенным подтверждением такого вывода является то, что основная излучающая область стримера (вблизи его головки) движется по кристаллу со скоростью $\sim 10^9 \text{ см/с}$. При этом локальную излучающую область порядка собственных размеров она проходит за время $\sim 10^{-11} \text{ с}$ [4, 5].

Таким образом, приведенные исследования показали, что ЭДП, возбуждаемая в полупроводниках стримерным разрядом, разогревается до температуры порядка 500 К. Кристаллическая решетка при этом практически не греется. Заметим, что при плотности ЭДП $\sim 10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ разогрев ее до 500 К не должен приводить к полному снятию вырождения. Как отмечено в работе [2], это, по-видимому, и обеспечивает сохранение условия инверсной заселенности в зонах и получение лазерной генерации при стримерном разряде. Заметим, однако, что в представленном эксперименте одновременно регистрировалось излучение как из головки стримера, так и из остающегося после нее трека. При этом длительность и интенсивность свечения головки стримера и трека различны. Поэтому для получения более однозначного результата необходимо разделение излучения от этих двух участков. Этого, видимо, можно будет добиться путем измерения спектра стримерного свечения с временным разрешением.

Авторы признательны В. Денису, Ж. Канцлерису и А. Даргису за полезные критические замечания по содержанию работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Nicoll F. H. — *Appl. Phys. Lett.*, 1973, v. 23, N 8, p. 465—466.
- [2] Басов Н. Г. и др. — *ЖЭТФ*, 1976, т. 70, в. 5, с. 1751—1761.
- [3] Грибковский В. П. — *ЖПС*, 1984, т. 40, в. 5, с. 709—718.
- [4] Обидин А. З., Печенов А. Н., Попов Ю. М., Фролов В. А., Набиев Р. Ф. — *Квант. электрон.*, 1982, т. 9, в. 8, с. 1530—1535.
- [5] Дубров В. Д., Исмаилов И., Обидин А. З., Печенов А. Н., Попов Ю. М. — *Квант. электрон.*, 1984, т. 11, в. 3, с. 611—612.
- [6] Зубрицкий В. В., Зюльков В. А., Чирвоный В. С., Яблонский Г. П., Грибковский В. П. — *Квант. электрон.*, 1985, т. 12, в. 4, с. 724—728.
- [7] Денис В., Пожела Ю. Горячие электроны. Вильнюс, 1971. 289 с.
- [8] Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М., 1970. 384 с.
- [9] Shah J., Leite R. C. C. — *Phys. Rev. Lett.*, 1969, v. 22, N 24, p. 1304—1306.
- [10] Shah J. — *Phys. Rev. B*, 1974, v. 9, N 2, p. 562—567.
- [11] Грибковский В. П., Паращук В. В., Яблонский Г. П. — *ФТП*, 1977, т. 11, в. 4, с. 626—629.
- [12] Bleil C. E., Broser I. — *J. Phys. Chem. Sol.*, 1964, v. 25, p. 11—22.
- [13] Балтрамеюнас Р., Жукаускас А., Куокштис Э. — *Письма ЖЭТФ*, 1981, т. 34, в. 4, с. 204—207.
- [14] Лысенко В. Г., Ревенко В. И., Тратас Т. Г., Тимофеев Р. Б. — *ЖЭТФ*, 1975, т. 68, в. 1, с. 335—345.
- [15] Schweizer H., Zielinski E. — *J. Luminesc.*, 1985, v. 30, N 1-4, p. 37—49.
- [16] Spiegelberg F., Gutsche E., Voigt J. — *Phys. St. Sol. (b)*, 1976, v. 77, N 1, p. 233—242.
- [17] Mooradian A., Fan H. Y. — *Phys. Rev.*, 1966, v. 148, N 2, p. 873—883.
- [18] Грибковский В. П., Паращук В. В., Рябцев Г. Н., Яблонский Г. П. — *ЖПС*, 1977, т. 26, в. 3, с. 551—553.
- [19] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М. 1976. 1005 с.

Институт физики полупроводников АН ЛитССР
Вильнюс

Получена 18.12.1987
Принята к печати 1.03.1988