

- [3] Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Филиппова М. Н. // Физика и химия стекла. 1983. Т. 9. № 6. С. 683—688.  
 [4] Галечья М. Г., Дианов Е. М., Лындин Н. М., Тищенко А. В. // Квантовая электрон. 1989. Т. 16. № 2. С. 344—346.

Институт общей физики АН СССР  
 Москва

Поступило в Редакцию  
 24 августа 1989 г.

06;07

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Г. М. Гусаков, А. И. Фролов

Исследования полупроводников, подвергнутых импульсному лазерному воздействию при низких температурах (77 К), привели к заключению о возможном влиянии атермических факторов на механизм структурных превращений [1, 2]. При отжиге ионно-имплантированных слоев кремния начало структурных превращений сдвигалось в сторону меньшей энергии импульса при понижении температуры от 300 до 77 К [2]. В цикле работ по импульсной лазерной обработке (ИЛО) InSb в среде жидкого азота описано возникновение метастабильной

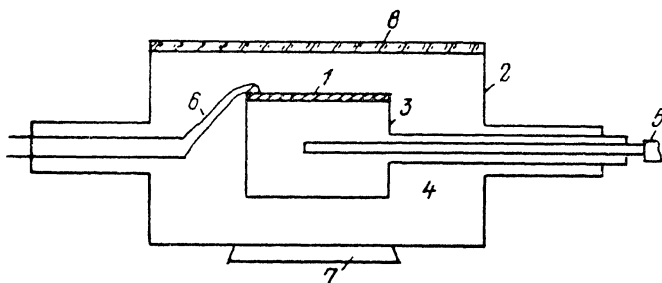


Рис. 1. Низкотемпературная оптическая ячейка.

металлической фазы [1, 3, 4]. Здесь также было отмечено, что начало превращений соответствует меньшим по сравнению с термической моделью энергиям. Атермический характер описанных переходов, по мнению авторов, связан с трансформацией полупроводника в металлическую фазу до достижения температуры плавления в условиях сильного электронного возбуждения. Если это так, то неравновесные фазовые переходы должны наблюдаться непосредственно в процессе лазерного облучения при низких температурах.

В настоящей работе представлены результаты исследования динамики коэффициента оптического отражения полупроводников  $R$  при температурах 77 и 300 К в условиях ИЛО. В качестве основного объекта исследования был выбран монокристаллический кремний, поскольку для этого материала известны теплофизические и оптические параметры в зависимости от температуры и результаты расчета динамики лазерного воздействия согласуются с данными экспериментов.

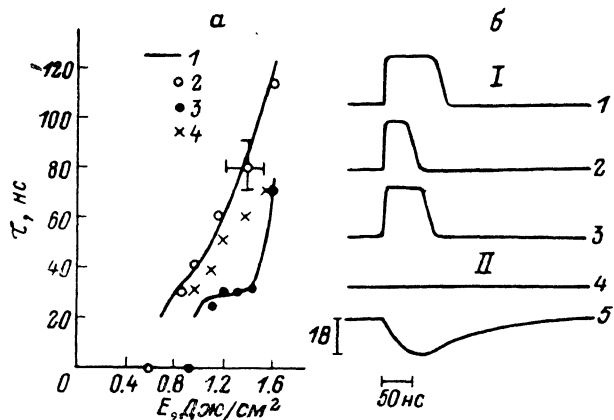
Методика экспериментов заключалась в следующем (рис. 1): образцы полупроводника 1 помещались в оптическую ячейку 2 на поверхность медной камеры 3. Объем ячейки 4 откачивался до давления  $1.3 \cdot 10^{-2}$  Па. Охлаждение образца осуществлялось потоком жидкого азота, поступающим через гибкий гелиевый сифон 5 внутрь медной камеры. Контроль температуры поверхности образца проводился термометром 6. Ячейка располагалась на предметном столике 7 эллипсометра ЛЭФ-3М, который передвигался в горизонтальной плоскости с помощью автоматического шагового манипулятора так, что излучение лазера, вводимое через оптическое окно 8, каждый раз воздействовало на необработанную поверхность полупроводника. Одномодовый лазер на АИГ/ $\text{Nd}^{3+}$  с внерезонаторным удвоением частоты ( $\lambda = 0.53$  мкм)

имел следующие параметры: длительность импульса на полувысоте 50 нс, диаметр области облучения на уровне  $1/e$  100 мкм. Зондирование центральной области пятна ( $\sim \varnothing 30$  мкм) проводилось с помощью He—Ne лазера ( $\lambda=0.63$  мкм) под углом падения  $50^\circ$ . Методика оптических измерений и лазерная установка описаны в [5].

На рис. 2, а представлены экспериментальные и теоретические зависимости длительности фазы высокого отражения (ФВО) от плотности энергии (выше порога плавления) лазерного излучения при температурах 77 и 300 К. Теоретические зависимости длительности ФВО рассчитывались при плотностях энергии, превышающих измеренные значения соответствующих порогов плавления кремния для указанных температур. В этом случае, как известно, достаточно решения одномерного нелинейного уравнения теплопроводности и не нужно учитывать диффузию носителей заряда в полупроводнике. Как видно, экспериментальные данные полностью соответствуют простой тепловой модели: при снижении температуры начало ФВО

Рис. 2. Зависимость длительности фазы высокого коэффициента отражения монокристаллического кремния от плотности энергии лазерного излучения (а) и динамика коэффициента отражения (б).

а: 1 — теоретические зависимости; 2—4 — экспериментальные данные при  $T=300$ , 77 К без пленки и  $T=77$  К с пленкой соответственно; б: 1 —  $E=1.4$ , II — 0.1 Дж/см<sup>2</sup>; Т, К: 1 — 300; 2, 4 — 77; 3, 5 — 77 К; время экспозиции образца в камере при  $P=1.3 \cdot 10^{-2}$  Па: 2, 4 —  $\leq 15$  мин; 3, 5 —  $\sim 1.5$  ч.



сдвигается в сторону больших энергий импульса и возникает характерная для  $\lambda=0.53$  мкм «пюльчка» (рис. 2, б, кривые 1, 2).

Экспериментальные значения порогов плавления скин-слоя кремния, равные  $E \cong 0.6$  ( $T=300$  К) и  $0.9$  Дж/см<sup>2</sup> ( $T=77$  К), соответствуют ожидаемым.

Вместе с тем низкотемпературная динамика отражения существенно зависит от времени экспозиции образца в ячейке. При энергиях ниже порога плавления в начальный период ( $\sim 15$  мин) особенность в динамике  $R$  отсутствует (рис. 2, б, кривая 4), однако с увеличением экспозиции образца характер отражения существенно меняется — появляется область низкого  $R$ , которая сохраняется вплоть до значения плотности энергии  $\sim 0.05$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 2, б, кривая 5). Контрольные эксперименты показали, что на поверхности образца растет пленка конденсирующихся паров (в основном  $H_2O$ ), обусловленная натеканием атмосферного воздуха в вакуумную систему. По данным эллипсометрии толщина пленки линейно зависела от времени экспозиции и через 1.5 ч составляла величину  $\sim 1000$  Å ( $P=1.3 \cdot 10^{-2}$  Па). С ростом толщины пленки снижение  $R$  и длительность области низкого отражения увеличивалось.

Наличие пленки на поверхности кремния приводит и к другим эффектам. Во-первых, при энергиях несколько выше порога плавления наблюдается увеличение ФВО при 77 К (рис. 2, б, кривая 3). Во-вторых, после облучения образца импульсами с энергией ниже, но близкой к пороговой, на поверхности образуется слой светло-серого цвета, что приводит к снижению стационарного  $R$  относительно первоначального значения для необлученной поверхности. Такое состояние релаксирует при температуре  $\sim 200$  К.

Аналогичные явления наблюдались нами и для других полупроводников (Ge, InSb, InP), а именно качественная картина динамики  $R$  и образование светло-серого слоя на поверхности полупроводника после облучения, также релаксирующего при  $T \sim 200$  К. У InP состояние с пониженным  $R$  оставалось устойчивым и при комнатной температуре. Отметим, что некоторое «низкоотражающее» состояние наблюдалось у InSb, которое предшествовало последующему переходу InSb в «высокоотражающее» метастабильное состояние при многократном облучении поверхности образца [6].

Следует еще раз подчеркнуть, что для всех изученных в работе полупроводников в отсутствие адсорбированной пленки не наблюдались какие-либо особенности, противоречащие тепловой модели. По нашему мнению, наблюдаемые явления указывают скорее всего на фи-

вико-химические, а не структурные превращения поверхностных слоев полупроводника при лазерном облучении в присутствии адсорбированного слоя. В связи с этим наличие адсорбата и его параметры должны контролироваться в процессе ИЛО при низких температурах.

### Список литературы

- [1] Громов Г. Г., Руденко К. В., Уфимцев В. Б. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 1998—2004.
- [2] Баолтрамеюнас Р., Гашка Р., Куокилис Э., Синюс Я. // Лит. физ. сб. 1987. Т. 27. № 4. С. 465—475.
- [3] Громов Г. Г., Капаев В. В., Копаев Ю. В., Руденко К. В. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Вып. 3. С. 119—121.
- [4] Руденко К. В., Жук С. В., Громов Г. Г. // ФТП. 1976. Т. 21. Вып. 10. С. 1750—1755.
- [5] Gusakov G. M., Komarnitskii A. A., Et A. S. // Phys. Stat. Sol. 1988. Vol. 107. P. 261—271.
- [6] Громов Г. Г., Руденко К. В., Уфимцев В. Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 16. С. 998—1001.

Московский институт  
электронной техники

Поступило в Редакцию  
20 декабря 1988 г.

В окончательной редакции  
1 декабря 1989 г.

04;10

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

## ИМПУЛЬСНЫЙ ОБЪЕМНЫЙ РАЗРЯД В КОРОТКИХ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ КАК ИСТОЧНИК УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

К. А. Клименко, Ю. Д. Королев

### Введение

Известно, что в импульсных разрядах при давлениях вплоть до атмосферного возможно получение ускоренных электронов [<sup>1-3</sup>]. Для этого необходимо, чтобы энергия, приобретаемая электронами в направлении движения на единице длины пути, была больше, чем отдаваемая в соударениях с тяжелыми частицами. Такие условия достигаются, например, в стадии запаздывания импульсного пробоя при высоких перенапряжениях [<sup>1-3</sup>]. Однако данная фаза кратковременна, поскольку процесс ускорения электронов в столбе разряда сопровождается интенсивным ионизационным размножением, проводимость плазмы быстро растет, падение напряжения на промежутке уменьшается и условие ускорения электронов перестает выполняться. Другой предельный случай относится к аномальному тлеющему разряду при пониженных давлениях газа. Здесь ускорение электронов происходит в прикатодном слое, а их энергия на входе в область отрицательного свечения определяется прикатодным падением потенциала.

В работах [<sup>4-6</sup>] проведены опыты по получению пучка быстрых электронов с энергией до 10 кэВ при давлениях до 100 Тор, который выходил за сеточный анод при зажигании разряда в коротких (доли миллиметра) межэлектродных промежутках. Авторы считают, что в рассматриваемой ситуации они имеют дело с особой формой разряда, не являющегося тлеющим, и предлагают называть его «открытым» разрядом (в том смысле, что анод не точный и важную роль играет плазма, созданная электронным пучком за анодом). В наших экспериментах [<sup>7</sup>] приведены доказательства того, что ускорение электронов происходит в катодном слое, а сам разряд по сути представляет собой импульсный тлеющий, в котором катодная область отделена от отрицательного свечения сеточным электродом. В настоящей работе представлены дополнительные данные в развитие этой идеи.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, а. Разряд в гелии при давлении  $p$  до 40 Тор зажигался между сплошным катодом 1 и анодом 2, выполненным в виде мелкоячейистой сетки с геометрической прозрачностью 75 %. Длина зазора в экспериментах