

нению условий коррозии в заземляющей системе, что необходимо учитывать при проектировании реконструкции подстанции. Аналогичным образом мы можем проследить, как изменятся коррозионные токи и компромиссный потенциал системы при изменении удельного сопротивления среды, т. е. при изменении условий коррозии.

Вывод: получен универсальный метод расчета коррозионных токов, позволяющий достаточно точно определять режимы работы каждого из электродов в многоэлектродной системе, а также проследить, каким образом влияет на коррозионные процессы изменение размеров электродов и условий, в которых находится система.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дёмин Ю.В., Дёмина Р.Ю., Горелов В.П. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах: в 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы / Ю.В. Дёмин, Р.Ю. Дёмина, В.П. Горелов; под ред. В.П. Горелова. — Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водного транспорта, 1998. — 209 с.
2. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник. — М.: ЗАО «Энергосервис», 1998. — 376 с.
3. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. — М.: АН СССР, 1959. — 600 с.

Поступила 03.11.2006 г.

УДК 621.315.592

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА

В.В. Парашук, К.И. Русаков*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, г. Минск
*Брестский государственный технический университет
E-mail: v_shchuka@rambler.ru

Промоделированы нелинейные оптические явления при стримерном разряде в гексагональных и кубических полупроводниках и показана возможность в этих условиях эффекта самоканализирования света.

Открытие стримерных разрядов в полупроводниках, сопровождающихся интенсивным лазерным эффектом (1973 г. [1]), стимулировало, с одной стороны, дальнейшее развитие физики пробойных и предпробойных явлений в сильных полях в твердых телах и, с другой стороны, способствовало возникновению нового научного направления — физики стримерного разряда в полупроводниках и физики стримерных лазеров. В настоящее время одной из тенденций в физике и технике полупроводниковых приборов является создание перспективных транзисторов, интегральных микросхем (оптоэлектронных систем) и новой элементной базы оптоакустоэлектроники на основе использования прямозонных материалов с большой шириной запрещенной зоны. В указанных соединениях роль излучательных, в том числе нелинейных оптических, процессов велика и проявляются они наиболее ярко, поэтому вопросы о протекающих в сильных электрических полях явлениях и взаимодействии оптических и электрических полей в данных средах актуальны. В этой связи представляется необходимым исследование соответствующих процессов при стримерном разряде в широкозонных полупроводниках, что связано с необычностью свойств и сложностью данного явления, возможностью получения новой информации о строении вещества и перспективой широких практических применений.

Пиковое значение интенсивности светового поля в канале стримерного разряда достигает значений $\sim 10^9 \dots 10^{11}$ Вт/см² и достаточно для возникновения различных нелинейных оптических эффектов в полупроводниках, в частности, самовоздействия излучения в режиме автоканализирования [2]. Однако в этих условиях, в том числе в средах с кубической (n_2) и пятого порядка (n_4) нелинейностями, коэффициенты n_2 , n_4 и остальные параметры рассматриваемой задачи — радиус волнового фронта, размеры и характер исходного пучка (двух- или трехмерный случай), детально не известны, в связи с чем требуется численное моделирование процесса. Ниже анализируются пороговые, энергетические и пространственные характеристики эффекта в зависимости от величин нелинейностей и других параметров для гексагональных и кубических полупроводников, рассмотрены условия оптимального автоканализирования.

В широкозонных соединениях типа A_2B_6 (гексагональных CdS, CdSe и кубических CdTe) эффекты самовоздействия носят сложный характер в зависимости от длительности импульсов, способа возбуждения (однофотонное, двухфотонное) и других условий, проявляющийся в конкуренции процессов самофокусировки и дефокусировки [3, 4]. При этом реализуется совместное действие нелинейностей $n_2 + n_4$ ($n_2 > 0$, $n_4 < 0$). Для указанных сред разработана теория самоканализирования (самоканализа-

ции) интенсивных световых пучков [2], результаты которой используются в настоящей работе.

Анализ существующих литературных данных по самовоздействию света указывает на целесообразность численного моделирования эффекта самоканалирования излучения в условиях разряда при варьировании коэффициентов нелинейностей в пределах $n_2 \sim 10^{-9} \dots 10^{-8}$ ед. СГСЭ, $n_4 \sim (10^{-14} \dots 10^{-12})$ ед. СГСЭ. Критерий эффекта, учитывающий дифракцию, самофокусировку и самодефокусировку света, можно записать следующим образом:

$$(2|n_2 E^2 n_4 E^4 / n_0|)^{1/2} = 1,22\lambda / (Dn_0), \quad (1)$$

где D – исходный диаметр пучка, λ – длина волны в вакууме, E – амплитуда напряженности электрического поля световой волны, n_0 – линейный показатель преломления среды. Соответствующая (1) мощность излучения равна

$$P_{\text{cr1-4}} = |cD / (64n_4) \{ [(n_0 n_2 D)^2 \pm 2 \cdot 1,22^2 n_0 n_4 \lambda^2]^{1/2} \pm n_0 n_2 D \}|. \quad (2)$$

Анализ четырех возможных значений P_{cr} согласно (2) показывает, что минимальный порог эффекта P_{cr1} соответствует знаку «–» в обеих диадах последнего выражения. Аналогично обозначим через P_{cr2} мощность, соответствующую знаку «+» в диадах, P_{cr3} – последовательно знакам «+», «–» и P_{cr4} – знакам «–», «+». В частности, для монокристаллов сульфида кадмия в области края собственного поглощения ($n_2 = 1,2 \cdot 10^{-9}$ ед. СГСЭ, $n_4 = -1,4 \cdot 10^{-12}$ ед. СГСЭ [3]) при $D = 1$ мм имеем $P_{\text{cr1}} \approx 150$, $P_{\text{cr2}} \approx 1830$, $P_{\text{cr3}} \approx 180$ и $P_{\text{cr4}} \approx 2160$ Вт. Мощность свечения, выходящего вдоль канала стримера, достигает $P \sim 10$ кВт [5], поэтому при стримерном разряде условие самоканалирования света по порогу эффекта $P_s > P_{\text{cr}}$ выполняется со значительным запасом.

В соответствии с теоретическими [6, 7] и экспериментальными [8] данными процесс самоканалирования излучения приводит к вытеснению плазмы неравновесных носителей за пределы светового канала, т. е. области сильного электрического поля, а следовательно – к уменьшению величины тока ниже порога разрушений. Это согласуется с отсутствием разрушений в накали стримерного разряда в полупроводниках [1] и может быть одной из причин его неразрушающего характера.

Оценим размеры самосжимающегося пучка в рассматриваемой среде, где радиус канала R осциллирует и зависит от размерности пучка [2]. Анализ зависимости $R(P_{\text{cr}})$ с учетом критерия (1) и экспериментальных данных для коэффициентов нелинейностей при оптическом возбуждении [3] указывает на наличие двух характерных минимумов (ветвей) этой зависимости (рис. 1), причем для критерия P_{cr1} ветви располагаются ниже, чем для P_{cr2} .

Наименьшему влиянию параметров волновой поверхности (b) подвержена ветвь в области $P_{\text{cr}} = 200 \dots 300$ Вт для случая P_{cr1} , в связи с чем она представляет наибольший интерес с точки зрения численного моделирования. Здесь b является коэффициентом пропорциональности в зависимости $R_2 = bR_0^2 / |Q|$, где $Q = n_2 E^2 / n_0$ (kR_0) $^{-2}$, R_f – радиус кри-

сталла, k – волновое число, $R_0 = D/2$ – радиус исходного пучка. Увеличение коэффициента нелинейности n_2 в пределах порядка по сравнению с известными данными для кристаллов CdS приводит к уменьшению пороговой мощности и поперечных размеров светового канала до значений, соответствующих параметрам стримера $P_{\text{cr}} \leq 10 \dots 30$ Вт, $R \leq 10$ мкм (рис. 2). Аналогичные изменения происходят с уменьшением коэффициента n_4 от $\sim 10^{-12}$ до 10^{-14} ед. СГСЭ.

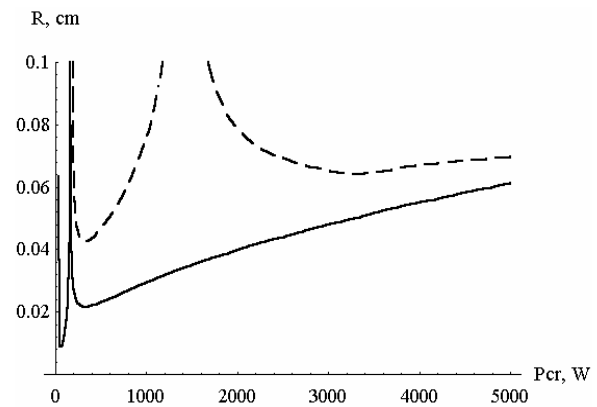


Рис. 1. Пространственно-энергетические характеристики эффекта самоканалирования света для критериев: 1) P_{cr1} и 2) P_{cr2} ; $n_2 = 1,2 \cdot 10^{-9}$ ед. СГСЭ, $n_4 = -1,4 \cdot 10^{-12}$ ед. СГСЭ, $b = 1$

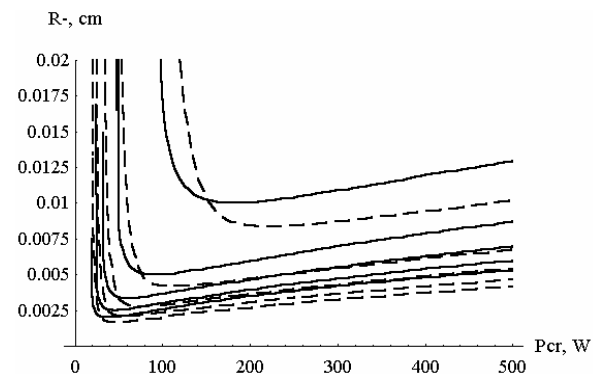


Рис. 2. Зависимость радиуса светового канала от пороговой мощности при варьировании коэффициентов нелинейности для сферических (сплошные кривые) и цилиндрических (штриховые) пучков: 1) $n_2 = 2 \cdot 10^{-9}$, 2) $4 \cdot 10^{-9}$, 3) $6 \cdot 10^{-9}$, 4) $8 \cdot 10^{-9}$, 5) 10^{-8} ед. СГСЭ; $n_4 = -10^{-12}$ ед. СГСЭ

На примере кристаллов сульфида кадмия рассчитаем анизотропию нелинейной восприимчивости пятого порядка $\chi^{(5)}$, определяющую пороговые и пространственные свойства самоканалирования света. Поведение системы в сильном электрическом поле может быть промоделировано использованием неполностью симметричного тензора 6-го ранга типа $[[V^2]^3]$ [9] или $[V^3][[V^2]^2]$ [10] – по аналогии с тензором электрооптического эффекта (данный тензор, как известно, несимметричен). Исследуем случай первого из них, результаты моделирования с учетом второго тензора подобны. Пространственное распределение $\chi^{(5)}$, соответствующее свертке данного тензора в плоскости типа (1010) кристаллов определяется соотношением

$$\chi_{(1010)}^{(5)} = \chi_{111} \sin^6 \Theta + \chi_{333} \cos^6 \Theta + 3(\chi_{113} + 4\chi_{155}) \sin^4 \Theta \cos^2 \Theta + 3(\chi_{133} + 4\chi_{355}) \sin^2 \Theta \cos^4 \Theta. \quad (3)$$

В приближении $\chi_{133} \approx \chi_{355} \approx \chi_{333}$; $\chi_{133} \approx \chi_{155} \sim 0,1 \chi_{333}$ соотношение (3) дает три направления, симметричные относительно $\langle 1210 \rangle$ ($\theta = \pi/2$), которые отличаются от направлений разрядов в среднем на $\pm(2...5)^\circ$. В базисной плоскости (0001) угловое распределение $\chi^{(5)}$ имеет вид

$$\chi_{(0001)}^{(5)} = 16(\chi_{111} - \chi_{222}) \cos^6 \varphi + 24(\chi_{222} - \chi_{111}) \cos^4 \varphi + 9(\chi_{111} - \chi_{222}) \cos^2 \varphi + \chi_{222} \quad (4)$$

и дает локальные максимумы в направлениях типа $\langle 1010 \rangle$ в достаточно широкой области $+\infty > \chi_{111} > \chi_{222}$. Анализ обоих соотношений (3) и (4) показывает, что пространственная анизотропия рассматриваемой нелинейной восприимчивости, а следовательно, и эффекта самоканалирования примерно соответствуют ориентации стримеров (с указанной точностью). Это свидетельствует о том, что данный эффект обуславливает не только кристаллографическую ориентацию, но и нитевидную форму стримерного разряда.

Аналогичные расчеты для кубических полупроводников (симметрии $\bar{4}3m$) с использованием тензоров 4-го ранга, например $[V^2]^2$ или $V[V^3]$, приводят к локализации максимумов распределения нелинейной восприимчивости в направлениях $\langle 110 \rangle$, соответствующих ориентации стримеров в кристаллах CdTe, GaAs и InP с точностью до нескольких градусов.

Следует отметить, что в экспериментально установленной пространственной картине (системе направлений) стримерных разрядов, в частности, в гексагональных полупроводниках [1, 11, 12] отсутствуют все основные элементы симметрии класса $6mm$, за исключением призматических плоскостей, в которых они локализованы; заметна асимметрия наблюдаемой картины (в пределах $0,5...1^\circ$) относи-

тельно оси 6-го порядка. Это свидетельствует об изменении (искажении) симметрии кристалла и о том, что в данных условиях одновременно возникают два семейства разрядов — положительно и отрицательно направленных (разнополярных) — в соответствии с представлениями [13]. В кубических полупроводниках также наблюдаются искажения симметрии решетки, проявляющиеся в неполном совпадении путей разрядов с направлениями [110]. В этой связи пространственная ориентация стримеров отражает точечную группу симметрии не только исходного, т. е. невозмущенного кристалла (известные принцип Неймана или теорема Германа), но и результат взаимодействия поля со средой и соответствует общему принципу суперпозиции симметрий Кюри — принципу сложения диссимметрий. Поэтому использование «неразрушающих» стримерных разрядов является тонким и в некоторых случаях уникальным инструментом исследования электрических, нелинейно-оптических, кристаллографических и ряда других свойств твердых тел в сильных полях.

Таким образом, рассмотрена возможность эффекта самовоздействия света в режиме самоканалирования (волноводный режим) при стримерном разряде в средах с кубической и пятого порядка нелинейностями. В рамках самосогласованной задачи оценены пороговые и пространственные характеристики самоканалирования света для гексагональных и кубических полупроводников. Эти данные близки к соответствующим характеристикам стримерных треков. Нелинейное взаимодействие излучения разряда с полупроводником в волноводном режиме приводит к нитеобразной форме стримера и уменьшает (исключает) разрушения кристаллической решетки. Симметрия системы кристаллографических направлений стримерных разрядов в широкозонных полупроводниках соответствует общему принципу суперпозиции симметрий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М. Стримерные лазеры на твердом теле // ЖЭТФ. — 1976. — Т. 70. — № 5. — С. 1751–1761.
- Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. О самофокусировке и самоканализации интенсивных световых пучков в нелинейной среде // ЖЭТФ. — 1966. — Т. 50. — № 6. — С. 1537–1549.
- Борщ А.А., Бродин М.С., Марчевский Ф.Н., Семиошко В.Н. Анизотропия нелинейной восприимчивости кристаллов сульфида кадмия // Квантовая электроника. — 1984. — Т. 11. — № 10. — С. 2041–2048.
- Борщ А.А., Волков В.И., Мицкан А.И. Двухволновое взаимодействие наносекундных лазерных импульсов в кристаллах CdTe и природа их нелинейности // Квантовая электроника. — 1995. — Т. 22. — № 4. — С. 383–385.
- Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М., Фролов В.А. Генерация оптического излучения в направлении распространения стримера в CdS // Краткие сообщения по физике. — 1978. — № 11. — С. 39–42.
- Богомолов Я.Л., Лирин С.Ф., Семенов В.Е., Сергеев А.М. Ионизационное самоканалирование сверхсильных электромагнитных волн в плазме // Письма в ЖЭТФ. — 1987. — Т. 45. — № 11. — С. 532–535.
- Келдыш Л.В. Ионизация в поле сильной электромагнитной волны // ЖЭТФ. — 1964. — Т. 47. — № 5(11). — С. 1945–1957.
- Зверев Г.М., Малдугис Э.К., Пашков В.А. О самофокусировке лазерного излучения в твердых диэлектриках // Письма в ЖЭТФ. — 1969. — Т. 9. — № 1. — С. 108–110.
- Fumi F.G. The Elastic Coefficients in Trigonal and Hexagonal Crystals // Phys. Rev. — 1952. — V. 86. — № 4. — P. 561.
- Vedam K., Srinivasan R. Non-Linear Piezo-Optics // Acta Crystallogr. — 1967. — V. 22. — № 5. — P. 630–634.
- Грибковский В.П. Стримерное свечение в полупроводниках // Журнал прикладной спектроскопии. — 1984. — Т. 40. — № 5. — С. 709–718.
- Грибковский В.П., Парашук В.В., Русаков К.И. О кристаллографической ориентации стримерных разрядов // ЖТФ. — 1994. — Т. 64. — № 11. — С. 169–171.
- Дьяконов М.И., Фурман А.С. Релаксация заряда в анизотропной среде и в средах с низкой размерностью // ЖЭТФ. — 1987. — Т. 92. — № 3. — С. 1012–1020.

Поступила 05.06.2006 г.