

3. A. L. Gurskii, V. V. Gruzinskii, A. N. Gavrilenko, I. I. Kulak, A. I. Mitkovets, G. P. Yablonskii, M. Scholl, M. Heuken. J. Appl. Phys. 77, 5394 (1995).

4. H. Kalish, H. Hamadeh, J. Muller, G. P. Yablonskii, A. L. Gurskii, J. Woitok, J. Xu, and M. Heuken. J. Electron Materials, 26, 1256 (1997).

5. G. P. Yablonskii, A. L. Gurskii, E. V. Lutsenko, I. P. Marko, H. Hamadeh, J. Soellner, W. Taudt, M. Heuken. Phys. status solidi (a), 159, 543 (1997).

6. V. K. Kononenko and I. S. Zakcharova. Preprint IC/91/63 (International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy (1991).

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В СУЛЬФИДЕ КАДМИЯ

Русаков К.И., Паращук В.В.

*Брестский политехнический институт,  
Институт физики НАН Беларуси*

Взаимодействие света и СВЧ-волн в полупроводниковых кристаллах является параметрическим, для которого интенсивность преобразования в приближении постоянного поля выражается в форме [1]:

$$S_3 \sim S_1 S_2 d_{3\phi}^2 [\sin(\Delta k L/2) / (\Delta k L/2)]^2,$$

где  $S_j$  - плотности мощности взаимодействующих волн,  $\Delta k$  - фазовая расстройка,  $L$  - длина кристалла,  $d_{3\phi}$  - эффективный коэффициент нелинейности, связывающий действительные значения поляризации и электрического поля. Выражение в квадратных скобках соответствует условию фазового синхронизма. Однако к.п.д. процессов преобразования частоты существенно зависит от коэффициента  $d_{3\phi}$ , определяемого симметрией кристалла, поляризациями и направлениями распространения взаимодействующих волн. Анализ результатов расчета коэффициента нелинейности по данным различных авторов показывает, что в отсутствие электрического поля  $d_{3\phi}$  изотропен в плоскости {0001} кристаллов CdS. Сильное внешнее поле, вектор которого расположен в данной плоскости, меняет симметрию решетки кристалла, и он становится псевдотригональным. При этом эффективный коэффициент нелинейности  $d_{3\phi}$  для различных видов взаимодействия волн оказывается пропорциональным  $\cos 3\phi$  или  $\sin 3\phi$ , откуда следует зависимость  $S_3 \sim \cos^6 \phi$  или  $\sim \sin^6 \phi$ , озна-

чающая, что направления максимальной эффективности взаимодействия расположены в плоскостях  $\{10\bar{1}0\}$  сульфида кадмия. В пределах каждой из таких плоскостей указанные направления определяются преимущественно условиями фазового синхронизма, т.е. соответствуют ориентации стримерных разрядов. Вследствие отсутствия сведений о коэффициентах  $d$  и нелинейного электрооптического эффекта учет максимальной эффективности взаимодействия волн в сильном электрическом поле совместно с условиями фазового синхронизма позволяет предсказать развитие данного процесса в пространстве для гексагональных кристаллов.

В расчетах направлений синхронизма СВЧ-волн и света [2] не затрагивался вопрос о границах спектральной области микроволновых колебаний. Рассчитаем длинноволновую и коротковолновую границы СВЧ-спектра, т. к. эти данные необходимы анализа возможных нелинейных взаимодействий волн в полупроводниках.

Значение длины СВЧ-волны ( $\lambda_{\text{свч}} \approx 3$  см), использовавшееся в [2], было определено на основании результатов работы [3], в которой показано, что электрическое поле в кристалле под действием высоковольтного короткого импульса напряжения совершает колебания с частотой  $\sim 10^9 \div 10^{12}$  Гц и может рассматриваться как источник электромагнитных волн (частота колебаний зависит от скорости нарастания внешнего поля и других факторов). Для кристаллов, рассматриваемых как волновод, необходимо учитывать невозможность распространения в них волн с длиной, превышающей критическую длину волны ( $\lambda$ ):

$$\lambda_{\text{max}} < \lambda_{\text{кр}}(\epsilon\mu)^{1/2}, \quad \text{где } \lambda_{\text{кр}} = 2[(m/a)^2 + (l/b)^2]^{1/2},$$

$m, l$  - характеристические числа;  $a \approx b \approx d$  - размер поперечного сечения волновода,  $\mu \approx 1$ . При условии  $0,5\lambda_{\text{кр}} < \lambda < \lambda_{\text{кр}}$  и  $m = 1, l = 0$  ( $m = 0, l = 1$ ) в волноводе может распространяться только один тип волн  $H_{10}$ , называемый основным.

Для того, чтобы определить границы спектра СВЧ, рассчитаем длину волн в приближении, когда нелинейная поляризация кристалла является постоянной в пространстве, но меняется во времени. В этом случае частота переменного электрического поля, генерируемого мощной световой волной в одноосном отрицательном кристалле, зависит от угла между оптической осью и направлением распространения световых волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\cos(\Theta) = \{(1 - [(\omega_1/\omega_c) n_c(\omega_1) / n_o(\omega_1)]^2) / (1 - [n_c(\omega_2) / n_o(\omega_2)]^2)\}^{1/2}.$$

Для кристаллов сульфида кадмия при  $\lambda_1 = 0,515$  мкм,  $\omega_1 \approx 3,664 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup>,  $n_o = 2,743$ ,  $n_c = 2,726$ . Аппроксимация дисперсии показателя прелом-

ления в области  $\lambda_1$  приводит к соотношению

$$\omega_1 = 5 \cdot 10^{14} \{0,918 + [0,843 + 359,027/(80,927 - \cos^2\Theta)^{1/2}]^{1/2}\}.$$

Экстраполяция длинноволновой границы СВЧ спектра дает значение  $\lambda \approx 3$  см. Коротковолновой край определяется максимальным значением частоты  $\omega = \omega_2 \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $\lambda \approx 0,2$  мм).

Оценку длины СВЧ волны можно получить также исходя из представления о взаимодействии света с потоком электронов [4]. Данный процесс рассматривается как частный случай параметрического взаимодействия, при котором световая волна частоты  $\omega_1$  движется навстречу волне  $\omega_2$  пространственного заряда и в результате их взаимодействия генерируется или усиливается световая волна большей частоты  $\omega_3$  - «преобразование частоты вверх»:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3,$$

$$k_1 - k_2 = k_3,$$

$$\omega_2 = k_2 v_0 - \omega_p / \zeta^{3/2},$$

где  $\zeta = (1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$ ,  $\omega_p$  - плазменная (ленгмюровская) частота,  $v_0$  - скорость электронов. Поскольку  $\omega_p / \zeta^{3/2} \ll \omega_0(1 + v_0/v_1)$ , то

$$\omega_3 \approx \omega_1 (1 + v_0/v_1) / (1 - v_0/v_3),$$

$$\omega_2 = \omega_1 v_0 (1/v_1 + 1/v_3) / (1 - v_0/v_3),$$

где  $v_1 = \omega_1/k_1$ ,  $v_3 = \omega_3/k_3$ . Учитывая, что для близких световых частот  $v_1 \approx v_3 = c$ , имеем  $\omega_2 \approx 2\omega_0 v_0/c$ . При  $\lambda = 0,5$  мкм,  $v_0 \approx 10^7$  см/с (дрейфовая скорость насыщения) частота волны пространственного заряда  $\omega_2 \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , что примерно совпадает с приведенным выше средним значением. Поскольку скорость переднего фронта стримера может быть выше дрейфовой для электронов, то больше будет и величина  $\omega_2$ .

Эти результаты подтверждаются данными работы [5], в которой определена частота автоколебаний плотности плазмы и электрического поля на переднем фронте стримера ( $\omega \approx 1,6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ). Сравнение с предыдущим расчетом показывает, что различные оценки длины СВЧ волн с учетом нелинейных процессов приводят к близким результатам и теоретически обосновывают возможность синхронизма рекомбинационного излучения и колебаний микроволнового диапазона при стримерном разряде.

### Литература

1. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика.- М.: Мир, 1976.- 261 с.
2. Грибковский В.П., Прокопья А.Н., Русаков К.И., Парашук В.В. Взаимодействие электрического поля со светом и направленность стри-

мерных разрядов // ЖПС.- 1994.- Т. 60, № 3 - 4, С. 362-368.

3. Streamer Discharges in Semiconductors / V.P. Gribkovskii, A.A. Gladyschuk, V.V. Zubritskii et al. // Phys. Stat. Sol. (a).- 1983.- Vol. 77, № 2.- P. 765-774.

4. Федорченко А.М., Коцаренко Н.Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах.-М.: Наука,1981.-176 с.

5. Владимиров В.В., Горшков В.Н., Константинов О.В., Кускова Н.И. Возбуждение высокочастотных автоколебаний в стримерных полупроводниковых лазерах // Доклады АН СССР.-1989.- Т. 305, № 3, С. 586-588.

## ОБУЧЕНИЕ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА БАЗЕ ТРЕХМЕРНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

*Шабeka Л.С., Сторожилow А.И.*

*Белорусская государственная политехническая академия*

Практическое освоение современных компьютерных технологий проектирования и обучения на основе построения компьютерно-графических моделей (КГМ) способствует как более глубокому пониманию студентами важности изучения традиционных графических дисциплин, так и освоению принципиально новых методов решения проектно-графических задач с применением ЭВМ.

Создание КГМ объектов можно выполнять точно так же как это делается традиционно - путем построения проекций объекта. При этом уже можно воспользоваться рядом преимуществ, предоставляемых современными системами инженерной компьютерной графики (ИКГ) по сравнению с традиционными методами: высокая (заданная) точность выполнения построений и преобразований, высокая эффективность и скорость выполнения чертежей за счет возможностей копирования (размножения) графических объектов, создания зеркальных отображений, использования геометрических расчетов по ходу построений, автоматизации вычерчивания типовых изображений и др.

Другим, на наш взгляд значительно более эффективным и естественным методом построения графической модели объекта, является создание ее трехмерной КГМ, которое основано на более совершенном - пространственном представлении графических объектов с точно определенными геометрическими параметрами формы и положения. Создание трех-