

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, Δk - 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 (λ):

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

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 ω_1 и ω_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⁻¹, $n_o = 2,743$, $n_c = 2,726$. Аппроксимация дисперсии показателя прелом-

ления в области λ_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 ω_1 движется навстречу волне ω_2 пространственного заряда и в результате их взаимодействия генерируется или усиливается световая волна большей частоты ω_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 $\zeta = (1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$, ω_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 ω_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-