

## ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

*Н.Г.Басов, А.Г.Молчанов, А.С.Насибов,  
А.З.Обидин, А.Н.Печенов, Ю.М.Попов*

Рассмотрен новый метод электрического возбуждения генерации света в полупроводниках и диэлектриках. В кристаллах  $CdS_xSe_{1-x}$  и  $ZnSe$  из областей излучения с характерными размерами  $\sim 5$  мкм, движущихся со скоростями  $1 + 4 \cdot 10^8$  см/сек, получена генерация света с интенсивностью  $\sim 10^9$  вт/см<sup>2</sup>.

В работе [1] был предложен метод получения генерации света путем возбуждения однородного полупроводника импульсами электрического поля. При достаточно высокой напряженности электрического поля вследствие ударной ионизации или туннельного эффекта в полупроводнике происходит резкое увеличение концентрации неравновесных носителей тока, распределенных в широкой энергетической полосе. Для получения инверсной населенности и генерации света необходимо быстрое выключение приложенного поля за время значительно меньшее времени жизни неравновесных носителей. Такая ситуация осуществляется в некоторых полупроводниках при распространении в них доменов Ганна [2].

В настоящей работе рассмотрен новый метод электрического возбуждения широкого класса полупроводников и диэлектриков, в котором возникновение большой концентрации неравновесных носителей тока за счет высокого поля само приводит к быстрому уменьшению напряженности электрического поля, замедлению и вырождению носителей тока и к интенсивной генерации света. При исследовании генерации в монокристаллических пластинках  $CdS$ , облучаемых электронным пучком [3], ранее наблюдались электрические разряды в виде ярко светящихся нитей, которые происходили внутри пластинок вследствие накопления объемного заряда. В работе [4] при возбуждении таких нитевидных разрядов электрическими импульсами наблюдалась генерация света, которая связывалась с акустоэлектрическим эффектом.

В данной работе проведено исследование генерации света из нитевидных разрядов в кристаллах  $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $CdS_xSe_{1-x}$  и  $ZnSe$ , возбуждаемых высоковольтным (до  $\sim 30$  кВ) генератором коротких электрических импульсов и дано объяснение наблюдаемых явлений.

Кристаллические образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки толщиной  $30 + 50$  мкм, на поверхности которых наносились диэлектрические зеркала с коэффициентами отражения 100 и 97%. Генерация света наблюдалась как при температуре жидкого азота так и при комнатной температуре. Возбуждение образцов происходило при подаче с металлического острия импульса электрического напряжения на кристалл, укрепленный на стеклянной или сапфировой пластинке, через разрядный промежуток в трансформаторном масле или жидком азоте.



Рис. 1. Полосы генерации в  $CdS$  при температуре  $T = 80^\circ K$ . Стрелкой указано приложения импульсного напряжения. Длина двойной полосы составляет  $0,8$  см.

Генерация происходила в направлении перпендикулярном поверхности кристаллических пластинок с угловой расходимостью  $\sim 20^\circ$  из нитевидных областей длиной несколько миллиметров и с диаметром нитей  $d = 3 + 5$  мкм (см. рис. 1). Спектр генерации соответствовал спектру, который наблюдался при возбуждении указанных кристаллов пучком быстрых электронов и состоял из отдельных мод, соответствующих толщине пластинок с полной шириной спектра от 1 до 7 мкм. Мощность генерации в  $CdS$  при температуре жидкого азота, измеренная с помощью коаксиального фотозлемента достигала 300 вт, при полной длительности импульса генерации равной  $0,5 + 2$  нсек. Временные характеристики процесса генерации исследовались с помощью скоростного фоторегистратора ФЭР-2. Сравнение снимков свечения образцов с временной разверткой и без нее (см. рис. 2) показывает, что область генерации света движется по кристаллу со скоростью  $v = 1 + 4 \cdot 10^8$  см/сек, при этом время свечения отдельной точки не превышает  $\sim 30$  нсек (временное разрешение прибора). Значительно более слабое послесвечение наблюдалось в течение десятков наносекунд после прекращения импульса генерации.

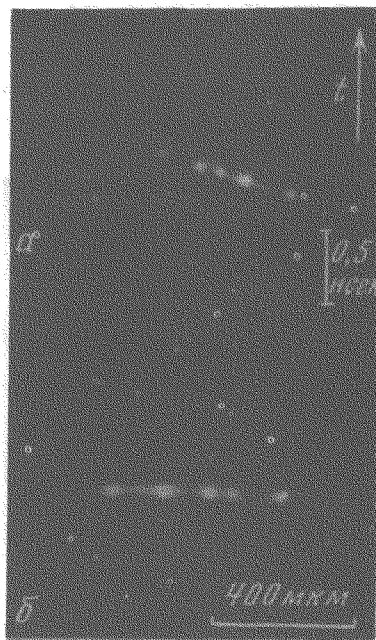


Рис. 2. Хронограмма излучения области генерации без временной развертки (а) и с временной разверткой (б)

Из угловой расходимости излучения следует, что область генерации представляет собой объем с характерным размером  $d \approx 5 \text{ мкм}$ , перемещающийся со скоростью  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ . Отсюда, а также из измерений мощности генерации отдельной нити ( $\sim 100 \text{ вт}$ ) следует, что интенсивность и удельная мощность излучения света достигают величин  $\sim 10^9 \text{ вт/см}^2$  и  $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ вт/см}^3$ , соответственно, при этом длительность генерации отдельного элемента объема кристалла составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$ . Такую высокую интенсивность генерации и соответствующую ей плотность неравновесных носителей  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , образующихся за времена  $\sim 10^{-12} \text{ сек}$ , могут обеспечить только ударная ионизация или туннельный эффект в сильном электрическом поле. Достаточно высокую скорость образования неравновесных носителей в сильном электрическом поле и быстрое выключение этого поля может объяснить стримерный механизм частичного пробоя твердых тел. Известно, что при частичном пробое стример развивается в определенных направлениях симметрии кристалла со скоростями  $\sim 10^8 \text{ см/сек}$  не вызывая макроскопических нарушений решетки [5].

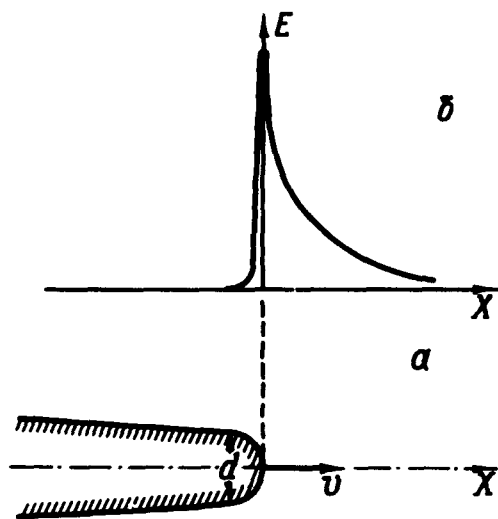


Рис. 3. Вид стримера, движущегося в направлении оси  $x$  (а) и распределение напряженности электрического поля вдоль оси стримера (б)

Вблизи "головки" стримера локальная напряженность электрического поля вызывает появление неравновесных носителей вследствие ударной ионизации или туннельного эффекта. При используемых напряжениях на электроде  $\sim 10^4$  в, локальная напряженность поля перед головкой стримера достигает величины  $\sim 10^7$  в/см и, в соответствии с формулами [6] для вероятностей ударной ионизации или туннельного эффекта дает за время  $\sim 10^{-12}$  сек концентрацию неравновесных носителей  $\sim 10^{21}$  см $^{-3}$ . При таких концентрациях резко повышается проводимость кристалла  $\sigma$ , которая для CdS достигает величины  $\sigma \approx 10^{14}$  сек $^{-1}$ . В проводящей среде электрическое поле спадает за время  $\tau = \epsilon/4\pi\sigma$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная кристалла, откуда для CdS получаем время  $\tau \approx 10^{-14}$  сек. Таким образом, распределение напряженности электрического поля, вдоль оси стримера (см. рис. 3) показывает, что условия рассмотренные в работе [1] для инверсной населенности и генерации света выполняются в стримере непосредственно за фронтом ионизации. Отметим, что при многократном повторении экспериментов на одном и то же образце положение нитей генерации практически не меняется. Движение малой по размерам области генерации позволяет легко получать управляемую последовательность ультракоротких импульсов света. Такого типа механизм интенсивной накачки с быстрым перемещением области возбуждения может найти применение для получения лазерного излучения в широком классе веществ.

### Литература

- [1] Н.Г.Басов, Б.М.Вул, Ю.М.Попов. ЖЭТФ, 37, 587, 1959.
  - [2] P.D.Southgate. IEEE J. of Quantum Elec., 4, 179, 1968.
  - [3] Н.Г.Басов, О.В.Богданкевич, А.С.Насибов, А.Н.Печенов, В.И.Козловский. П.В.Шапкин, В.М.Каменев, И.М.Почерняев, В.П.Папуша. ДАН СССР, 205, 72, 1972.
  - [4] F.H.Nicoll. Appl. Phys. Lett., 23, 465, 1973.
  - [5] Г.И.Сканави. Физика диэлектриков. М., ГИФМЛ, 1958.
  - [6] Л.В.Келдыш. ЖЭТФ, 33, 994, 1957; 34, 962, 1958; 37, 713, 1959.
-