

## ИНВЕРСНАЯ НАСЕЛЕННОСТЬ И ВЫНУЖДЕННОЕ СВЕРХСВЕЧЕНИЕ ПРИ ПРОБОЙНОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ

Г.П.Пека, В.А.Бродовой, Н.З.Дерикот, В.П.Пожаров

Сообщается о наблюдении стимулированного излучения возникающего при высоковольтном переключении симметричных структур  $\text{In} - \text{GaAs} (\text{Cu}) - \text{In}$  в низкоомное состояние. Первичным актом при переключении в таких структурах является генерация электронно-дырочных пар при ударной ионизации. Последующая модуляция высокоомного сопротивления базы по  $\tau_p$  – механизму за время  $10^{-8}$  сек позволяет реализовать условия быстрого снятия поля с базы. Вследствие этого при достаточно высоких плотностях токов через структуру выполняются условия, необходимые для инверсной населенности.

В настоящей работе предлагается метод получения инверсной населенности и стимулированного излучения при полевой генерации пар в кристаллах с S-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) и малым временем переключения. Сообщается о наблюдении стимулированного излучения, возникающего при высоковольтном переключении симметричных структур  $\text{In} - \text{GaAs} (\text{Cu}) - \text{In}$  в низкоомное состояние. Переключение в таких структурах связано с генерацией электронно-дырочных пар при ударной ионизации и последующей модуляцией сопротивления высокоомной базы по  $\tau_p$  -механизму [1].

Возможность стимулированного излучения при полевой генерации пар носителей предсказана в [2, 3]. Однако создание инверсной населенности при пробое затруднено нагревом носителей в сильном электрическом поле, снимающим вырождение [3].

Инверсную населенность при лавинном пробое можно было бы получить, подавая на кристалл высоковольтные импульсы с коротким временем спада ( $\tau_c$ ), обеспечивающие концентрацию неравновесных носителей, достаточную для вырождения.

Амплитуда импульса задается величиной критического поля ( $E_{кр}$ ) необходимого для лавинной генерации пар, а  $\tau_c$  ограничивается временем жизни неравновесных носителей ( $\tau$ ) при концентрациях пар  $n$ , обеспечивающих вырождение ( $\tau_c \ll \tau$ ). Для получения инверсной населенности необходимо также условие:  $\tau_E \ll \tau$ , где  $\tau_E$  – время релаксации по энергии.

Для  $\text{GaAs}$  при  $77^\circ \text{K}$   $E_{кр} = (2,8 + 4,7) \cdot 10^5$  в/см, время жизни пар относительно спонтанной излучательной рекомбинации при  $n \sim 10^{17}$  см $^{-3}$ ,  $\tau \sim 10^{-8}$  сек [4], а  $\tau_E \sim 10^{-12}$  сек. Формирование высоковольтных импульсов со столь малой длительностью спада является

весьма сложной задачей. Вероятно поэтому стимулированное излучение при пробое в обычных условиях экспериментально не обнаружено.

В исследованном нами эффекте высоковольтного переключения условие быстрого снятия с базы структуры выполняется автоматически: время переключения в низкоомное состояние меньше  $10^{-8}$  сек. Как показано ниже, при достаточно высоких плотностях токов выполняются и остальные условия, необходимые для инверсной населенности.

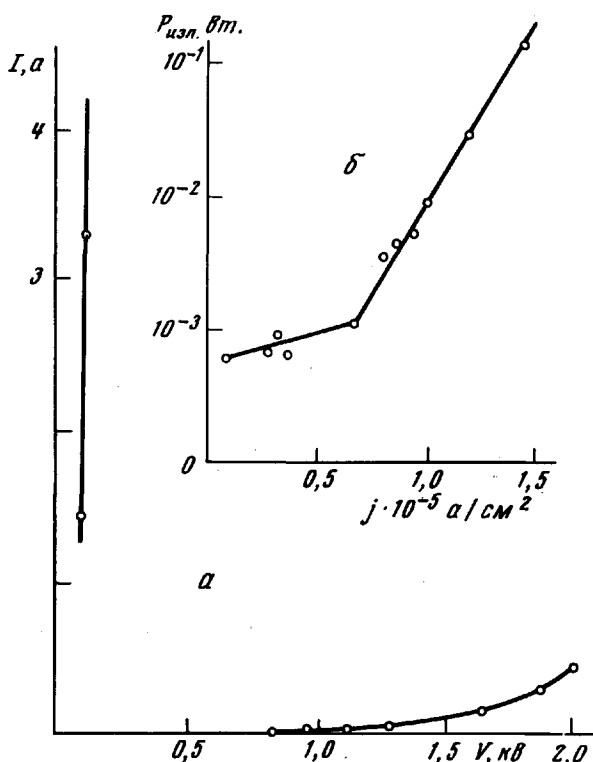


Рис. 1. *a* – Вольт-амперная характеристика структуры In Ga As (Cu) – In, *б* – зависимость мощности излучения от плотности тока  $T = 77^\circ \text{K}$

На рис. 1, *a* дана типичная ВАХ структуры In – Ga As (Cu) In снятая в импульсном режиме при  $77^\circ \text{K}$ . При пороговом напряжении ( $\sim 2 \text{ кВ}$ ) наблюдается переключение в низкоомное состояние. После переключения остаточное напряжение на структуре не превышает  $50 \text{ в}$ , а ток определяется ограничительным сопротивлением. Вертикальный рост тока после переключения связан с образованием токового шнура [5]. О возникновении шнура свидетельствует наблюдавшееся при разрушении структуры проплавление канала диаметром  $10^{-2} \text{ см}$ , при увеличении частоты следования импульсов напряжения до  $500 \text{ мк}$ . При обычно используемых токах через структуру плотность тока в шнуре составляет  $(3 + 6) \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$ , а максимальная рабочая плотность тока достигает  $1,6 \cdot 10^5 \text{ а/см}$ . При этом, как показывают оценки, концентрация электронно-дырочных пар в шнуре  $n \approx (2 + 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что достаточно для вырождения в Ga As при  $77^\circ \text{K}$ .

В момент переключения наблюдается импульс мощного собственного рекомбинационного излучения. Зависимость мощности излучения в

максимуме полосы ( $P_{\text{изл}}$ ) от плотности тока через структуру ( $j$ ) показана на рис. 1, б. При малых токах излучение слабо увеличивается с ростом  $j$ . Начиная с  $j = (7 + 9) \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$  наблюдается резкое возрастание  $P_{\text{изл}}$ ; при увеличении  $j$  в два раза  $P_{\text{изл}}$  возрастает в 200 раз. Таким образом, для зависимости  $P_{\text{изл}}$  от  $j$  характерно наличие пороговой плотности тока ( $j_{\text{пор}}$ ).

При пороговых значениях токов наблюдается резкое изменение спектра излучения. При плотностях тока ниже пороговых регистрируется широкая полоса излучения с максимумом вблизи края собственного поглощения ( $h\nu_{\text{max}}^e = 1,49 \text{ эв}$ ) и полушириной  $\delta(h\nu)_{1/2} = 500 \text{ \AA}$  (рис. 2, кривая 1). При плотностях тока, превышающих пороговые, наблюдается резкое сужение полосы излучения до  $\delta(h\nu)_{1/2} \approx 100 \text{ \AA}$  (рис. 2, кривая 2). Сужение полосы сопровождается резким увеличением интенсивности излучения. Максимум полосы при этом сдвигается в сторону меньших энергий ( $h\nu_{\text{max}}^b = 1,46 \text{ эв}$ ). Приведенные спектры построены с учетом самопоглощения излучения; использована спектральная зависимость коэффициента поглощения, полученная в [6].

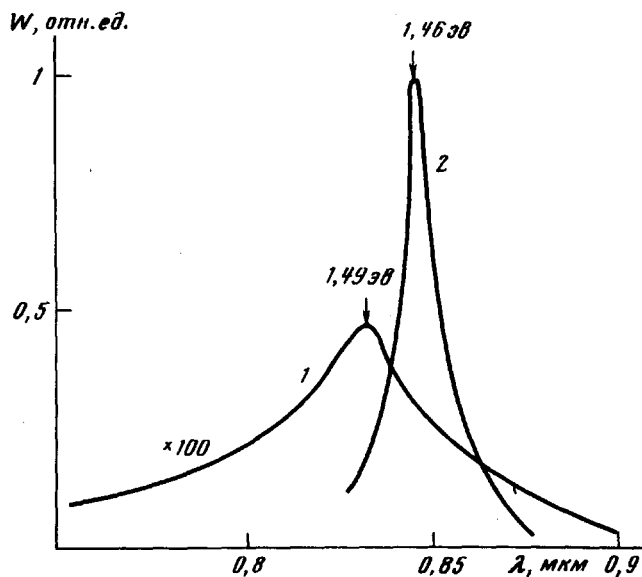


Рис. 2. Спектры излучения структуры In – GaAs (Cu) – In при разных плотностях тока  $j$ ,  $\text{а/см}^2$ : 1 –  $6,5 \cdot 10^4$ ; 2 –  $18,5 \cdot 10^4$   $T = 77^\circ\text{К}$

Исследование зависимости интенсивности излучения от расстояния между структурой и фотоумножителем показало, что интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, т.е. регистрируемое излучение не является направленным.

Измерена квантовая эффективность излучения  $\eta$  и ее зависимость от плотности тока в шнуре ( $j$ ). При  $j$ , меньших  $j_{\text{пор}} = 8,5 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$   $\eta$  составляет всего  $5 \cdot 10^{-2}\%$ , а при достижении пороговой плотности тока  $\eta$  резко возрастает до значений  $\sim 40\%$  при  $j \sim 2 \cdot 10^5 \text{ а/см}^2$ .

Сверхлинейная зависимость интенсивности излучения от уровня возбуждения, наличие резкого порога на этой зависимости, сильное сужение спектра при пороговых токах, а также резкий рост квантовой эффективности при токах выше порогового свидетельствует о том, что

при переключении имеет место вынужденное рекомбинационное свечение [7,8].

Киевский  
государственный университет  
им. Т.Г. Шевченко

Поступила в редакцию  
9 июля 1974 г.

### Литература

- [1] В.А.Бродовой, А.Ч.Гозак, Г.П.Пека. ФТП, 8, 990, 1974; В.А.Бродовой, Н.З.Дерикот, Г.П.Пека, В.П.Пожаров. ФТП в печати.
  - [2] Н.Г.Басов, В.Н.Вул. Ю.М.Попов. ЖЭТФ, 37, 587, 1959.
  - [3] Л.В.Келдыш. ЖЭТФ, 37, 713, 1959.
  - [4] И.П.Варшни. Сб. "Излучательная рекомбинация в полупроводниках", М., изд. Наука, 1972.
  - [5] В.Л.Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, А.Г.. Миронов. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М., изд. Наука, 1972.
  - [6] M.D.Sturge. Phys. Rev., 127, 768, 1962.
  - [7] Ж.Панков. Оптические процессы в полупроводниках. М., изд. Мир, 1973.
  - [8] А.Ярив. Квантовая электроника и нелинейная оптика. М., изд. "Советское радио", 1973.
-