

БРЭГГОВСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ ЧАСТОТЫ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ЛАЗЕРЕ НА ГОРЯЧИХ ДЫРКАХ Ge

А.А. Андронов, В.А. Козлов,
С.А. Павлов, С.Г. Павлов

В настоящее время активно исследуются характеристики стимулированного излучения в дальнем ИК-диапазоне горячих дырок в германии. Излучение возникает при помещении охлаждаемого жидким гелием образца в магнитное поле и приложении импульсов напряжения, приводящих к возникновению усиления в широком диапазоне длин волн $\lambda \sim 80-120$ мкм. Большинство выполненных ранее экспериментов было проведено на образцах в виде прямоугольных параллелепипедов, являющихся одновременно и активной средой и сверхразмерными слабоселективными резонаторами на полном внутреннем отражении. Из-за плохой селекции спектр излучения таких образцов достаточно широк, а использование традиционных для лазерной техники методов селекции мод затруднено здесь условиями, при которых наблюдается стимулированное излучение.

Было предпринято несколько попыток получения узкой линии генерации. Так, в [1] была получена узкая линия на тонком образце на границе области генерации. В [2] проводились исследования по сужению спектра излучения на образце с накладными зеркалами и слабопоглощающими прокладками между зеркалами и образцом. Недавно сообщено [3] о получении узкой линии в образце с накладными плоским и сферическим зеркалами. Однако остается непонятным, как указанными способами получить узкую линию генерации на заданной длине волны.

В настоящей работе для осуществления селекции предлагается наносить дифракционную решетку (ДР) на боковую поверхность образцов с одновременной фиксацией направления распространения пучка. Боковые поверхности образца с нанесенной на них ДР образуют брэгговские зеркала, осуществляющие селекцию частоты (вставка на рис. 1, б). Для синхронной с ДР длины волны, удовлетворяющей условию [4],

$$\lambda = 2nd \sin \theta, \quad (1)$$

пучок, падающий на ДР, дает один зеркально отраженный и один дифрагированный точно назад пучки, т.е. в первом приближении потеря в моду не вносится; здесь λ - длина волны в вакууме, n - показатель преломления Ge ($n \approx 4$), d - период ДР, θ - угол падения на ДР. Для других длин волн (не удовлетворяющих условию синхронизма) дифрагированный пучок отклоняется в сторону, рассеивается и частично выходит из образца. Таким образом, на несинхронных частотах возникают дополнительные потери, при-

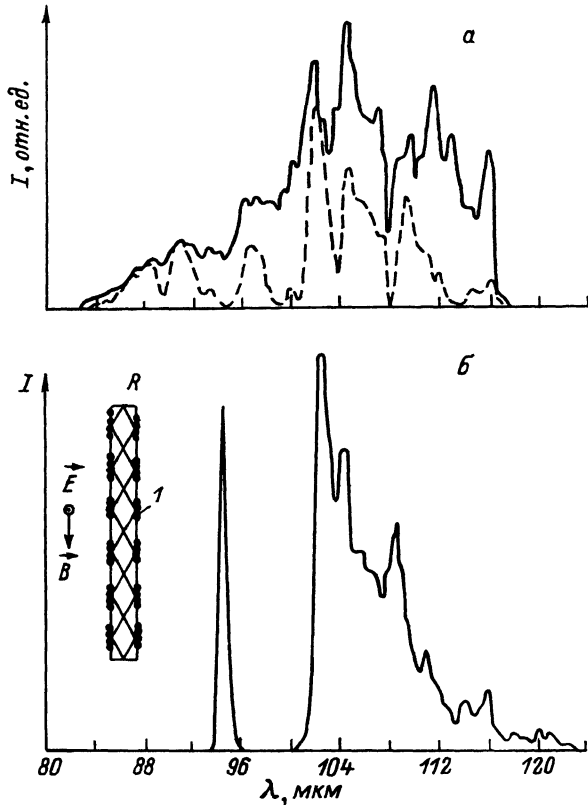


Рис. 1. Спектры излучения лазера с резонатором: а) фиксирующим направление распространения пучка, без ДР; б) фиксирующим направление распространения пучка, после нанесения ДР; R - сферический торец.

водящие к подавлению генерации на этих частотах. Отметим, что для длинноволновой части излучения, удовлетворяющей условию [4],

$$\lambda > \lambda_{\text{кр}}, \quad \lambda_{\text{кр}} = nd(1 + \sin \theta), \quad (2)$$

дифрагированный пучок отсутствует и селекция на эту часть спектра не распространяется.

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений спектра стимулированного излучения из образца с размерами $51 \times 7 \times 5 \text{ мм}^3$, изготовленного из $p\text{-Ge}$ с удельным сопротивлением $\sim 45 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Длинная ось образца совпадает с кристаллографическим направлением [111]. Расстояние между контактными гранями 7 мм, между зеркальными - 5 мм. Параметры брэгговских зеркал выбраны так,

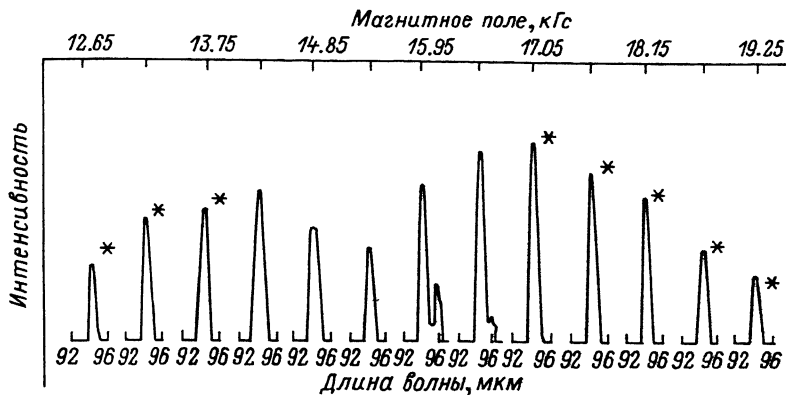


Рис. 2. Разрез по зоне генерации в интервале длин волн 80–100 мкм, осуществляемый изменением магнитного поля B , при постоянном электрическом поле $E = 2.6$ кВ/см. Звездочкой отмечены магнитные поля, спектр генерации при которых состоит только из одной синхронной линии.

что они настроены на длину волны $\lambda = 94.4$ мкм. Торцевая мода не возбуждалась из-за малости коэффициента усиления $\alpha \sim 0.03$ см $^{-1}$.

Спектральные измерения проводились на откачиваемом дифракционном спектрометре с разрешением ~ 0.3 мкм. Спектр образца с фиксированным направлением распространения пучка качественно не отличался от спектра образца, выполненного в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 1, а). Изрезанность этого спектра коррелирует со спектральными линиями поглощения водяного пара, который содержался в продуваемых неосушенным гелием трактах, подводящих излучение к спектрометру. Заполнение части подводящих трактов (≈ 50 см) атмосферным воздухом вызывает возникновение спектральных провалов (почти до нуля сигнала при отношении сигнал/шум ~ 1000) в соответствующих участках спектра (пунктир на рис. 1а).

Нанесение ДР приводит к возникновению четкой спектральной линии шириной ~ 0.3 мкм рис. 1б на длине волны, даваемой формулой (1). При $\lambda > \lambda_{кр}$ селекция отсутствует в хорошем соответствии с (2). Большой интервал между синхронной волной и областью $\lambda > \lambda_{кр}$ (составляющий здесь 5.5 мкм) позволяет легко получить генерацию только на синхронной длине волны за счет соответствующего подбора величин электрического и магнитного полей (рис. 2), причем одночастотная генерация имеет место в достаточно широкой области E и B полей. Интенсивность сигнала на синхронной длине волны $\lambda = 94.4$ мкм после нанесения ДР выросла \approx в 7 раз, кроме того, при уменьшении входной щели спектрометра (вплоть до величины $\sim \lambda/2$) интенсивность этой линии падает медленнее, чем в других линиях оставшегося спектра ($\lambda > \lambda_{кр}$). Это говорит в пользу того, что выделенная линия обладает большой спектральной плотностью мощности в узком интервале длин волн. Отметим, что частота синхронной линии находится в спектральном провале, обусловленном наличием

атмосферного воздуха в тракте, однако, несмотря на это, излучение на синхронной длине волны сравнительно хорошо проходило заполненный атмосферным воздухом тракт, что свидетельствует о существенном повышении спектральной плотности мощности, приходящийся на интервал прозрачности между двумя линиями поглощения. Изменение интенсивности сигнала на синхронной длине волны от величины магнитного поля (рис. 2) может быть обусловлено квантованием легких дырок по уровням Ландау (ср. [5]); в то же время уменьшение интенсивности в интервале магнитных полей $14.3 \leq B \leq 16.5$ кГс коррелирует с возникновением излучения с длиной волны $\lambda > \lambda_{кр}$ и свидетельствует о возникновении конкуренции частот в нелинейном режиме.

Измерения, проведенные на других образцах с разными углами распространения пучка, показали очень хорошее соответствие положения синхронной линии с (1). При необходимости расстояние между синхронной линией и $\lambda_{кр}$ может быть увеличено за счет уменьшения угла падения на ДР. Отметим, что полученная генерация с узким спектром вблизи фиксированной длины волны позволяет исследовать зависимость линейного коэффициента усиления системы дырок на этой длине волны от E , B полей, что весьма затруднено в условиях конкуренции [1, 6].

Таким образом, показана возможность создания лазера на ρ - Ge со спектром излучения в виде узкой линии с наперед заданной длиной волны в интервале 80–120 мкм.

Пользуемся возможностью поблагодарить А.В. Муравьева, Ю.Н. Ноздрина и В.Н. Шастина за помощь в работе и обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Андронов А.А., Мазов Л.С., Митягин Ю.А. и др. Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 184 с.
- [2] Komiyama S., Kuroda S. - Jpn. J. Appl. Phys., 1987, v. 26, p. L71.
- [3] Gornik E., Helm M., Unterreiner K., et al. - Appl. Phys. Lett., 1988, v. 52, N 7, p. 564–566.
- [4] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 м.
- [5] Komiyama S. In Proceedings of the 18th International Conference on the Physics of Semiconductors (World Scientific, Stockholm, 1986), p. 1641–1650.
- [6] Komiyama S., Kuroda S. - Solid State Commun., 1986, v. 59, p. 167–171.