

# Формирование перестраиваемого излучения среднего ИК диапазона при генерации второй гармоники в кристалле $\text{CdGeAs}_2$ \*

С.Дас

*Сообщается о генерации перестраиваемого излучения среднего ИК диапазона в процессе ГВГ излучения перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера с использованием кристалла  $\text{CdGeAs}_2$ . Измерены угловые перестроечные характеристики этого кристалла на длине волны  $\text{CO}_2$ -лазера, а также угловая и спектральная ширины приема. При ГВГ на длине волны 10.6 мкм в кристалле  $\text{CdGeAs}_2$  зарегистрирована в 6.25 раза большая эффективность преобразования, чем в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$ .*

**Ключевые слова:** перестраиваемый  $\text{CO}_2$ -лазер, генерация второй гармоники, нелинейный кристалл  $\text{CdGeAs}_2$ .

## 1. Введение

Метод нелинейного смешения частот является хорошо укоренившимся методом получения перестраиваемого излучения в спектральной области, недоступной для лазерного источника. Из всех известных методов процесс ГВГ является самым простым, а эффективность преобразования в его случае может быть гораздо больше, чем при любом другом взаимодействии. С момента открытия ГВГ Франкеном и др. [1] в 1961 г. были выращены и протестированы на возможность применения в эффективных лазерных устройствах многочисленные нелинейные кристаллы. Однако до настоящего времени не создан идеальный кристалл для применения в лазерных устройствах от УФ до ИК спектрального диапазона, и поиск эффективных кристаллов продолжается до сих пор.

Особый интерес для различных приложений, таких как атмосферный мониторинг, детектирование газов в следовых концентрациях в спектральном окне прозрачности атмосферы, лазерная спектроскопия, оже-рекомбинация и др., представляет оптическое излучение в диапазоне 3–5 мкм. Из-за отсутствия перестраиваемого лазерного источника излучение этого спектрального диапазона может быть получено либо посредством генерации разностной частоты, либо за счет оптической параметрической генерации. Оба вышеупомянутых процесса имеют достоинства и недостатки. Вторая гармоника излучения перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера также может служить перестраиваемым источником в спектральном диапазоне 4.5–5.5 мкм, обеспечивая большую эффективность генерации излучения, чем любой другой процесс, поскольку является простейшим процессом оптического преобразования частоты. Удвоение частоты  $\text{CO}_2$ -лазера было изучено независимо разными исследователями в различных прозрачных для ИК излучения кристаллах, таких как

$\text{AgGaSe}_2$  [2–6],  $\text{AgGaS}_2$  [7],  $\text{ZnGeP}_2$  [8–11],  $\text{Ti}_3\text{AsS}_3$  [12, 13],  $\text{GaSe}$  [14, 15],  $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$  [16–20],  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$  [21–23] и  $\text{CdSiP}_2$  [24], каждый из которых имеет как достоинства, так и недостатки.

Арсенид кадмия германия ( $\text{CdGeAs}_2$ , CGA), положительный одноосный кристалл с точечной группой симметрии  $42m$  и оптическим пропусканием от 2.4 до 18 мкм, может быть подходящим кандидатом для генератора второй гармоники излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. Арсенид кадмия германия, кристалл тройного халькопирита, имеет самую высокую нелинейность второго порядка (236 пм/В) в группе неорганических нелинейных кристаллов и известен с 1967 г. [25]. Он отлично подходит для ГВГ излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, а также для генерации ИК излучения второго атмосферного окна прозрачности (спектральный диапазон 8–12 мкм) через оптические параметрические процессы. Оптические свойства этого кристалла были описаны Байером и др. [26] и Бойдом и др. [27]. О ГВГ излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера и генерации разностной частоты сообщалось Килдалом и др. [28]. Хотя прикладное устройство на кристалле CGA демонстрировалось еще в начале 1970-х годов, его применение было ограничено из-за недоступности кристалла большого размера и хорошего оптического качества. Развитие технологии выращивания позволило создать кристаллы, пригодные для использования в лазерных устройствах [29, 30]. Были продемонстрированы также такие лазерные устройства, как эффективный параметрический генератор в спектральном диапазоне 7–20 мкм [31, 32] и генераторы второй гармоники и суммарной частоты [33–36]. О температурной зависимости эффективности ГВГ сообщили Закель и др. [37]. В настоящей статье, возможно впервые, демонстрируется генерация перестраиваемого излучения среднего ИК диапазона при ГВГ излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера.

## 2. Эксперимент

В эксперименте использовался кристалл CGA первого типа с размерами  $6 \times 10 \times 5.7$  мм, вырезанный под углом  $41^\circ$ . Его пропускание во всем спектральном диапазоне было измерено фурье-спектрофотометром, а в спектральной области 9–11 мкм – с использованием непрерывного

\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

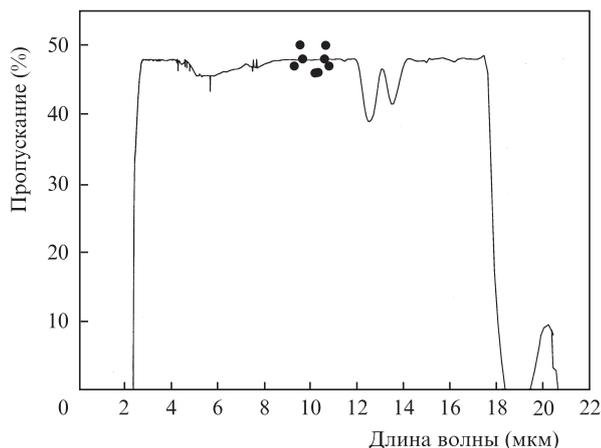


Рис.1. Пропускание кристалла CdGeAs<sub>2</sub> толщиной 5.7 мм. Кривая соответствует спектрофотометрическому измерению, точки – измерению с помощью излучения перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера в спектральной области 9–11 мкм.

CO<sub>2</sub>-лазера (без учета потерь на френелевское отражение, рис.1; см. также [25, 31]). Из измеренного коэффициента пропускания с использованием соотношения, представленного в [38], был определен коэффициент поглощения этого кристалла толщиной 5.7 мм, составивший 0.05–0.09 см<sup>-1</sup> в пределах всей пригодной для его использования области пропускания.

Источником накачки в нашем эксперименте служило излучение отпаянного непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера, перестраиваемого в диапазоне 9.2–10.78 мкм. Для увеличения пиковой мощности внутри лазерного резонатора помещался механический прерыватель, который помогал также при обнаружении генерируемого излучения. Излучение непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера фокусировалось на кристалл линзой из ZnSe с фокусным расстоянием 12 см. Кристалл размещался не в фокусе линзы, а в пределах конфокальной длины (6.5 см), чтобы избежать любых повреждений поверхности. Длина волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера контролировалась спектроанализатором. Генерируемое излучение второй гармоники детектировалось микроканальным детектором, охлаждаемым жидким азотом и работающим без предварительного усилителя. Остаточное непреобразованное излучение на основной частоте блокировалось пластинкой из сапфира толщиной 3 мм. Электрический сигнал от детектора отображался на запоминающем осциллографе с полосой пропускания 100 МГц.

### 3. Результаты и их обсуждение

Зависимости фазосогласованных перестроечных характеристик от длины волны для ГВГ в кристалле CGA показана на рис.2. Кривые соответствуют теоретическим расчетам, полученным с использованием разных коэффициентов Селлмейера по Като, как сообщалось Водопьяновым и др. [32]. Видно, что экспериментальные точки находятся в хорошем согласии с предсказанными фазосогласованными углами [32]. Максимальное отклонение экспериментальных значений от расчетных, полученных из коэффициентов Селлмейера [32], составляет ±0.5°. Оно может быть обусловлено трудностью обнаружения пика фазового согласования в связи с широкой угловой, а также спектральной полосой. Используя другие доступные коэффициенты Селлмейера [28, 39], мы нашли, что пред-

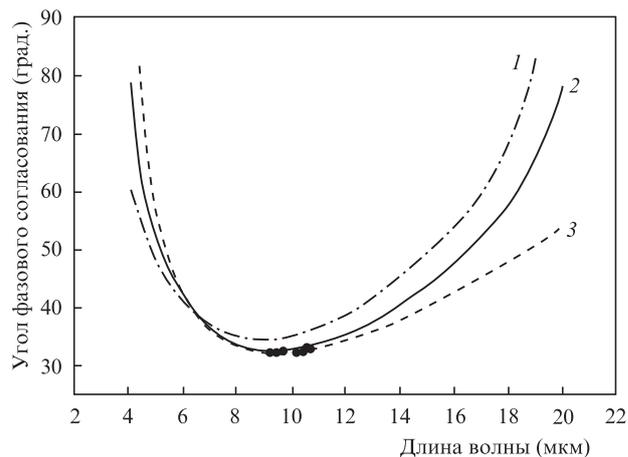


Рис.2. Зависимости фазосогласованных перестроечных характеристик от длины волны для ГВГ первого типа (еe → o) в кристалле CdGeAs<sub>2</sub> (CGA). Кривые соответствуют расчету коэффициентов Селлмейера с использованием данных [26] (1), [28, 39] (2) и [32] (3), точки отвечают измеренным значениям.

сказанные углы фазового синхронизма различаются более чем на 1°, однако имеется большое отклонение (около 10°) измеренного угла фазового согласования от полученного теоретически с использованием коэффициентов Селлмейера, сообщавшихся Байером и др. [26]. Отличие измеренных углов фазового согласования от расчетных значений, полученных с помощью других коэффициентов Селлмейера [26, 28, 39], может быть обусловлено неточными значениями дисперсии на желаемых длинах волн, найденными по коэффициентам Селлмейера из [26, 28, 39]. Угловая ширина полосы фазового согласования в этом кристалле также измерялась на длине волны 10.6 мкм. Выявлено, что измеренная полная ширина по полувысоте (внутри кристалла) равна 0.9°, в то время как ее расчетное значение составляет 0.597° [32]; полная угловая (по показаниям детектора «от нуля до нуля») ширина полосы равна 1.3° при соответствующем расчетном значении 1.35°. Эти различия могут быть связаны с ошибками измерения из-за флуктуаций показаний на выходе детектора, а также с неточностью значения дисперсии, полученного из уравнений Селлмейера. Подобная угловая полоса фазового согласования наблюдалась и на других длинах волн. Кроме того было обнаружено, что при изменении длины волны основного излучения от 9.2 до 10.7 мкм изменения в выходных показаниях детектора практически отсутствуют. Наблюдавшееся изменение выходного сигнала было связано с изменением мощности пучка на основной частоте. Из рис.3 следует, что имеется широкий угол фазового согласования в спектральном диапазоне излучения CO<sub>2</sub>-лазера.

Из-за низкой выходной мощности (1 Вт) непрерывного излучения на основной частоте мы не могли измерять мощность излучения на 10.6 мкм измерителем мощности, но могли сравнивать эффективность преобразования для кристалла CGA толщиной 5.7 мм с кристаллом ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP) толщиной 3 мм путем измерения выходной энергии генерируемой второй гармоники излучения CO<sub>2</sub>-лазера на 10.6 мкм при разных плотностях мощности. Для этого положение фокуса линзы изменялось так, чтобы кристалл находился в пределах конфокального расстояния (6.5 см). Из данных, приведенных на рис.3, следует, что эффективность преобразования для кристал-

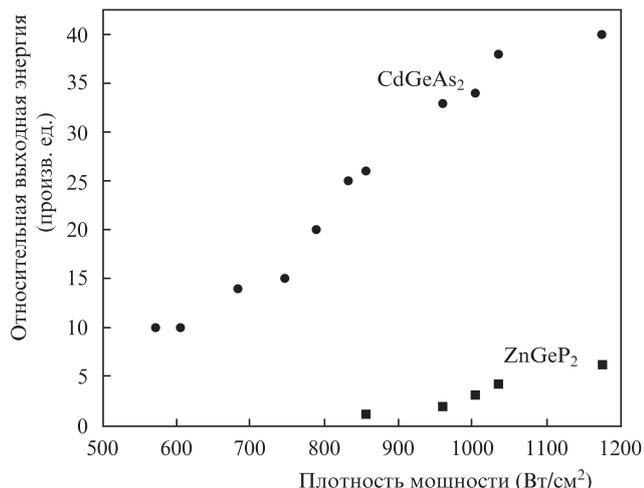


Рис.3. Зависимости относительной выходной энергии от плотности мощности при ГВГ излучения CO<sub>2</sub>-лазера в кристаллах CdGeAs<sub>2</sub> толщиной 5.7 мм и ZnGeP<sub>2</sub> толщиной 3 мм; длина волны излучения накачки 10.6 мкм.

ла CGA примерно в 6.25 раза больше, чем для кристалла ZGP, хотя рассмотрение эффективного параметра качества ( $d_{\text{eff}}^2/n^3$ ) показало, что на 10.6 мкм кристалл CGA примерно в 60 раз эффективнее кристалла ZGP. До конца не ясно, почему сигнал, полученный с кристаллом CGA, почти в 10 раз меньше. Это может быть следствием значительных потерь падающей мощности (около 32% от передней поверхности для падающего пучка и около 35% от задней поверхности для генерируемого пучка) вследствие френелевского отражения от поверхностей кристалла из-за большого угла поворота кристалла CGA (~30°) по сравнению с кристаллом ZGP, входная поверхность которого была почти нормальна к падающему излучению. Следует упомянуть, что о 15%-ной эффективности преобразования для ГВГ второго типа синхронизма излучения ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера на длине волны 10.6 мкм при длительности импульса 160 нс и толщине кристалла 9 мм сообщали Килдал и др. [28], а о 62%-ной эффективности преобразования для ГВГ излучения на длине волны 10 мкм лазера на свободных электронах, имеющего длительность импульса 3.9 пс и толщину кристалла 7 мм, – Водопьянов и др. [32].

#### 4. Выводы

Таким образом, установлено, что кристалл CGA является отличным кандидатом для генерации в средней ИК области посредством смешения частот. При ГВГ преимущество этого кристалла заключается в том, что из-за плоской угловой перестроенной характеристики фазового согласования для излучения CO<sub>2</sub>-лазера, а также широкого угла приема нет нужды перенастраивать кристалл на пик фазового согласования при изменении длины волны падающего излучения. С точки зрения параметра качества кристалл CGA гораздо эффективнее, чем кристалл ZGP.

Автор сердечно благодарит DRDO, Правительство Индии за частичную финансовую поддержку и д-ра К.Л.Водопьянова (Стэнфордский университет, США) за предоставленный для этого эксперимента кристалл CGA.

1. Franken P.A., Hill A.E., Peters C.W., Weinreich G. *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 118 (1961).
2. Russel D.A., Ebert R. *Appl. Opt.*, **32** (20), 6638 (1993).
3. Bhar G.C., Das S., Chatterjee U., Rudra A.M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27** (2), 231 (1994).
4. Bhar G.C., Das S., Chatterjee U., Rudra A.M., Feigelson R.S., Route R.K. *J. Appl. Phys.*, **74** (8), 5282 (1993).
5. Eckardt R.C., Fan Y.X., Byer R.L., Route R.K., Feigelson R.S., Van der Laan J. *Appl. Phys. Lett.*, **47** (8), 786 (1985).
6. Byer R.L., Choy M.M., Herbst R.L., Chemla D.S., Feigelson R.S. *Appl. Phys. Lett.*, **24** (2), 65 (1974).
7. Kildal H., Kupeck P.J., Robertson D.S., Smith R.C. *Opt. Commun.*, **3** (1), 29 (1971).
8. Bhar G.C., Das S., Chatterjee U., Vodopyanov K.L. *Appl. Phys. Lett.*, **54** (4), 313 (1989).
9. Mason P.D., Jackson D.J., Gorton E.K. *Opt. Commun.*, **110** (1–2), 163 (1994).
10. Барыкин А.А., Давыдов С.В., Дорохов В.Д., Захаров В.П., Бутузов В.В. *Квантовая электроника*, **20** (8), 794 (1993).
11. Андреев Ю.М., Баранов Ю.М., Воеводин В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **14** (11), 2137 (1987).
12. Shure D.R. *Appl. Phys. B*, **52** (6), 367 (1991).
13. Auyeung R.C., Zielke D.M., Flefdman B.J. *AIP Conf. Proc.*, **60**, 238 (1987).
14. Bhar G.C., Das S., Vodopyanov K.L. *Appl. Phys. B*, **61** (2), 187 (1995).
15. Абдуллаев Г.Б., Кулевский Л.А., Прохоров А.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **16** (3), 130 (1972).
16. Bhar G.C., Das S., Chatterjee U., Datta P.K., Andreev Yu.M. *Appl. Phys. Lett.*, **63** (10), 1316 (1993); Bhar G.C., Das S., Satyanarayan D.V., Datta P.K., Nundy U., Andreev Yu.M. *Opt. Lett.*, **20** (20), 2057 (1995).
17. Takaoka E., Kato K. *Opt. Lett.*, **24** (13), 903 (1999).
18. Андреев Ю.М., Батулин И.С., Гейко П.П., Гусамов А.И. *Квантовая электроника*, **29** (1), 904 (1999).
19. Appollonov V.V., Lebedev S.P., Komandin G.A., Shakir Yu.A., Badikov V.V., Andreev Yu.M., Gribnyukov A.I. *Laser Phys.*, **9** (6), 1236 (1999).
20. Schunemann P.G., Setzler S.P., Pollak T.M. *J. Crystal. Growth*, **211** (1–4), 257 (2000).
21. Das S., Chatterjee U., Ghosh C., Gangopadhyay S., Andreev Yu.M., Lanski G., Badikov V.V. *Opt. Commun.*, **259** (2), 868 (2006).
22. Takaoka E., Kato K. *Tech. Digest CLEO'98* (Washington DC: OSA, 1998, Vol. 6, pp 253).
23. Андреев Ю.М., Бадиков В.В., Воеводин В.Г. и др. *Квантовая электроника*, **31** (12), 1075 (2001).
24. Gonzalez L., Upchurch D., Barnes J., Schunemann P.G., Zawilski K., Guha S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7197**, 71970N (2009).
25. Borschchevskii A.S., Goryunova N.A., Kesamanly F.P., Nasledov D.N. *Phys. Stat. Sol.*, **21**, 9 (1967).
26. Byer R.L., Kildal H. *Appl. Phys. Lett.*, **19** (7), 237 (1971).
27. Boyd G.D., Buehler E., Storz F.G. *Appl. Phys. Lett.*, **18** (7), 301 (1971).
28. Kildal H., Mikkelsen J.C. *Opt. Commun.*, **10** (4), 306 (1974).
29. Schunemann P.G., Setzler S.D., Pollak T.M., Ptak A.J., Myers T.H. *J. Cryst. Growth*, **225** (2–4), 440 (2001).
30. Schunemann P.G., Pollak T.M. *J. Cryst. Growth*, **174** (1–4), 272 (1997).
31. Vodopyanov K.L., Schuneman P.G. *Opt. Lett. B*, **23** (14), 1096 (1998).
32. Vodopyanov K.L., Knippels G.M.H., van der Meer A.F.G., Maffetonec J.P., Zwieback I. *Opt. Commun.*, **155** (1–3), 47 (2002).
33. Tanaka E., Kato K. *MRS Proc.*, **484**, 475 (1997).
34. Chemla D.S., Begley R.F., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **10** (1), 71 (1974).
35. Menyuk N., Iseler G.W., Mooradian A. *Appl. Phys. Lett.*, **29** (7), 422 (1976).
36. Menyuk N., Iseler G.W. *Opt. Lett.*, **4** (2), 55 (1979).
37. Zakel A., Blackshire J.L., Schunemann P.G., Setzler S.D., Goldstein J., Guha S. *Appl. Opt.*, **41** (12), 2299 (2002).
38. Bhar G.C., Smith R.C. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **13** (1), 157 (1972).
39. Bhar G.C. *Appl. Opt.*, **15** (2), 305 (1976).