



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



**Радиофизический
факультет**



8-я Международная научно-практическая конференция

**Актуальные проблемы радиофизики
АПР 2019**

Сборник трудов конференции



**РОССИЙСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**1-4 октября 2019 года
г. Томск**

Генерация ТГц-излучения на разностной частоте в ZnGeP₂ при накачке излучением стронциевого лазера

Юдин Николай Николаевич

*Дёмин Виктор Валентинович, Грибенюков Александр Иванович, Половцев Игорь Георгиевич, Зиновьев Михаил Михайлович, Юдин Николай Александрович, Солдатов Анатолий Николаевич
Национальный исследовательский Томский государственный университет*

E-mail: rach3@yandex.ru

В лазере на парах стронция реализуется генерация в ИК-области спектра на восьми лазерных переходах с длинами волн: ~ 1,03 мкм; 1,09 мкм; 2,6 мкм; 2,69 мкм; 2,92 мкм; 3,01 мкм; 3,06 мкм; 6,45 мкм [1,2]. Данное излучение попадает в окно прозрачности нелинейных кристаллов, таких как ZnGeP₂, GaSe, имеет узкую ширину спектральных линий генерации, характерную для газовых лазеров и наиболее полно удовлетворяет требуемым временным и энергетическим параметрам лазерного излучения накачки для реализации генерации ТГц-излучения на разностной частоте.

Общий принцип действия генератора разностной частоты терагерцового излучения заключается в передаче энергии световых волн – волны накачки (ω_p) и сигнальной волны (ω_s), слабой электромагнитной волне на частоте ω_i (холостая волна), удовлетворяющих соотношению $\omega_p = \omega_s + \omega_i$. Физической причиной смещения волн является квадратичная нелинейность поляризации среды, проявляющаяся при высоких уровнях накачки ($P = \epsilon E + \chi(2)E^2 + \dots$, где ϵ – линейная диэлектрическая восприимчивость, χ – квадратичная нелинейная восприимчивость, E – напряженность электрического поля световой волны). Усиление холостой волны происходит при выполнении условия фазового синхронизма $k_p = k_s + k_i$ (где k_p , k_s , k_i – волновые вектора).

Условие фазового синхронизма можно также записать как

$$\frac{n_p(\lambda_p)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s)}{\lambda_s} = \frac{n_i(\lambda_i)}{\lambda_i} \quad (1)$$

где n_p , n_s , n_i – показатели преломления волны накачки, сигнальной и холостой волн. Изменяя направление распространения волны накачки и сигнальной волны по отношению к оптической оси кристалла, например, путем изменения угла (θ) между направлением излучения и оптической осью кристалла, можно изменять усиление холостой волны, в соответствии с условием фазового синхронизма. Зависимость показателя преломления необыкновенной волны от угла θ определяется следующим соотношением [3]

$$n_e(\lambda, \theta) = n_o(\lambda) \sqrt{\frac{1 + \tan^2(\theta)}{1 + \left(\frac{n_o(\lambda)}{n_e(\lambda)}\right)^2 \tan^2(\theta)}} \quad (2)$$

Для расчета углов синхронизма в монокристалле ZnGeP₂ при накачке излучением лазера на парах стронция с длинами волн ~ 1,3 мкм использовались уравнения Зельмеера для излучения среднего ИК диапазона (3), (4) [3] и уравнение Зельмеера для ТГц-излучения (5) [4], а также формулы (1) и (2). Результаты расчетов приведены в таблице 1.

$$n_o^2(\lambda) = 4.47330 + \frac{5.26576\lambda^2}{\lambda^2 - 0.13381} + \frac{1.49085\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55} \quad (3)$$

$$n_e^2(\lambda) = 4.63318 + \frac{5.34215\lambda^2}{\lambda^2 - 0.14255} + \frac{1.45795\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55} \quad (4)$$

$$n_o^2(\lambda) = 10.93904 + \frac{0.60675\lambda^2}{\lambda^2 - 1600} \quad (5)$$

Таблица 1.

Тип синхронизма	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм	ω , ТГц	Угол синхронизма
o-e-o	1,03	1,09	18,7	16	64
e-o-o	2,6	2,69	77,7	3,9	29
e-o-o	2,92	3,01	97,65	3	27
-	2,69	2,92	34,15	8,78	-
-	2,6	2,92	23,7	12,6	-
-	2,69	3,01	25,3	11,8	-
-	2,6	3,01	19,088	15,7	-
e-o-o	3,01	3,06	184,212	1,6	19
-	2,6	3,06	17,296	17,35	-
e-o-o	2,92	3,06	63,823	4,7	37
-	2,69	3,06	22,247	13,48	-

Импульсная мощность ТГц-излучения, генерируемого на разностной частоте в приближении медленно меняющихся амплитуд и приближении заданного поля, без учета влияния поглощения определяется соотношением [5]

$$P_{thz} = \frac{2\omega_i^2 d_{eff}^2 L^2 P_p P_s}{\varepsilon_0 c^3 n_p n_s n_i} \text{sinc}^2\left(\frac{|\Delta k|L}{2}\right), \quad (6)$$

где, ω_i – частота генерируемого излучения; $d_{eff} = 75$ пм/В – коэффициент нелинейной восприимчивости второго порядка, L – длина кристалла; P_p , P_s – импульсная мощность излучения накачки и излучения сигнальной волны соответственно; ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме; c – скорость света; n_p , n_s , n_i – показатели преломления для излучения накачки, сигнальной и холостой волн, соответственно;

Расчетное значение импульсной мощности, полученное по формуле (4), без учёта влияния поглощения и при длине кристалла равной эффективной длине, отличается от экспериментально полученного значения, не более чем на 30% [4]. В связи с чем, данное выражение можно использовать для расчета мощности ТГц-излучения, генерируемого на разностной частоте. Средняя мощность генерируемого ТГц-излучения рассчитывается по формуле

$$P = P_{thz} f t, \quad (7)$$

Соотношение (6) указывает на то, что необходимо повышать среднюю мощность излучения накачки и сигнальной волны и уменьшать длительность их импульсов излучения для увеличения средней мощности ТГц-излучения

На рис. 1 проведены результаты расчета, по формулам (6,7), средней мощности ТГц-излучения ($\lambda_3 \sim 63$ мкм; 77 мкм; 97 мкм; 184 мкм) в зависимости от средней мощности генерации лазера на парах стронция (частота следования импульсов ~ 10 кГц) при длительности импульсов 1 нс. Расчеты проводились при оптимальной длине монокристалла ZnGeP2 соответствующей наиболее эффективной генерации для каждой из вышеуказанных линий.

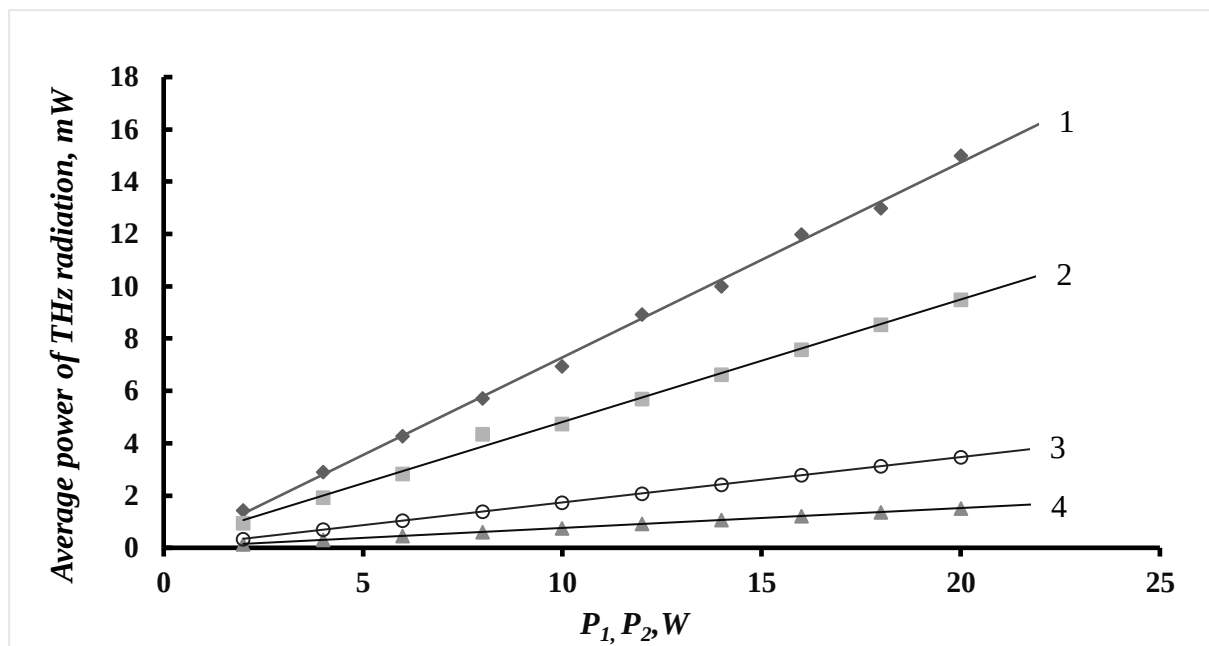


Рис. 1. Зависимость средней мощности ТГц-излучения (λ_3) от средней мощности волны накачки (λ_1) и сигнальной волны (λ_2) при длительности импульсов ~ 1 нс: 1 – ($\lambda_1 = 2,92$ мкм; $\lambda_2 = 3,01$ мкм; $\lambda_3 = 97,65$ мкм); 2 – ($\lambda_1 = 3,01$ мкм; $\lambda_2 = 3,06$ мкм; $\lambda_3 = 184$ мкм); 3 – ($\lambda_1 = 2,92$ мкм; $\lambda_2 = 3,06$ мкм; $\lambda_3 = 63,823$ мкм); 4 – ($\lambda_1 = 2,6$ мкм; $\lambda_2 = 2,69$ мкм; $\lambda_3 = 77,7$ мкм)

Как показали расчеты, уровень средней мощности ТГц-генерации в монокристалле ZnGeP2 может составлять ~ 10 мВт при накачке на разностной частоте при уровне средней мощности ~ 16 Вт в каждой линии и длительности импульсов ~ 1 нс. При этом реализуется линейная зависимость нарастания средней мощности ТГц-генерации с увеличением средней мощности генерации лазера на парах стронция.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.2712.2017/4.6).

Список публикаций:

- [1] Soldatov A. N., Sabotinov N. V., Latush E. L., Chebotarev G. D., Vuchkov N. K., Yudin N. A. Strontium and calcium vapour lasers. Vol. I / - Bulgarian. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House. 2013. 293 p.
- [2] A. N. Soldatov, N. V. Sabotinov, E. L. Latush, G. D. Chebotarev, N. K. Vuchkov, N. A. Yudin. Strontium and calcium vapour lasers. Vol. II / - Bulgarian. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House. 2014. – 322 p.
- [3] Nikogosyan D. Handbook "Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey" / Springer. 2005. 1-st ed. 440 p. ISBN: 9780387220222
- [4] Creeden D., McCarthy J. C., Ketteridge P. A., Southward T., Schunemann P. G., Komiak J. J., Dove W., Chicklis E. P. // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2007. Vol. 13(3). P. 732-736
- [5] Aggarwal R. L., Lax B. Nonlinear Infrared Generation (Edited by Shen Y.R.) / (New York: Academic). 1977. 28 p.