

## OPTİK TEZLİKLƏRİN REZONATORDAXİLİ KVAZİSİNHRONİZM REJİMİNDƏ GENERASİYASI

**R.C. QASIMOVA, Ə.Ə. KƏRİMİ**

*Bakı Dövlət Universiteti,  
Bakı, AZ-1148, Z. Xəlilov küç., 23*

İşdə periodik strukturlu mühitlərdə rezonator daxili kvazisinxron rejimində ikinci harmonikanın generasiya prosesi nəzəri olaraq sabit-intensivlik yaxınlaşmasında araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, rezonator daxili tezlik çevrilmə prosesi zamanı harmonika amplitudası qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların fazalar fərqiindən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır və bu asılılıq ossilyasiya xarakteri daşıyır. Xoşagəlməz faza sürüşməsinə kompensasiya edərək daha yüksək çevrilmə effektivliyini almaq olar.

Koherent şüalanmanın kiçikölçülü mənbələrinin işlənməsi lazer fizikasının aktual problemlərindəndir ki, məsələn bu sahədəki yeni nailiyyətlərdən və qeyri-xətti optikanın müasir metodlarından istifadə etməklə həll etmək olar.

Məlumdur ki, eyni bir rezonator daxilində şüalanmanın bir tezlikdə generasiyası və eyni zamanda onun digər tezliyə çevrilməsi tezlik çevrilməsinin effektiv üsullarından biridir. Bu fakt onunla bağlıdır ki, stasionar rejimdə generasiya olunan lazerlərin tezliyinin çevrilməsi zamanı lazer rezonatorunun daxilində şüalanma intensivliyi lazer çıxış şüalanması intensivliyindən xeyli böyükdür ki, buna da səbəb çıxış güzgüsünün buraxma əmsalının qiymətinin kiçik olmasıdır. Harmonikaya çevrilmə effektivliyi əsas şüalanmanın intensivliyindən birbaşa asılı olduğu üçün, tezliyin rezonator daxilində çevrilməsi prosesi onun rezonator xaricində olan prosesə nisbətən daha effektiv baş verir. Ona görə kəsilməz rejimdə işləyən lazerlər üçün dalğaların (misal üçün harmonikaların) rezonator daxili generasiyasının istifadəsi çevrilmə effektivliyinin əhəmiyyətli dərəcədə artımını əldə etməyə imkan verir [1, 2].

Çevrilmənin rezonator daxili üsulundan ən azı iki üsulla həyata keçirmək olar. Birinci üsul optik rezonator da iki vacib elementin olmasını nəzərdə tutur: aktiv lazer mühiti və qeyri-xətti optik mühiti. Əvvəlcədən inversiyaya malik aktiv mühitdə optik keçidin tezliyində lazer generasiyası baş verir. Sonra şüalanma qeyri-xətti optik mühitdən keçərək digər tezlikli şüalanmaya çevrilir (məsələn, harmonika tezliklərində, cəm tezliklərdə və s.) [2].

Lazer rezonatoru daxilində harmonikanın generasiyası zamanı havanın dispersiyası, qeyri-xətti mühitdə dalğaların qrup sürətlərinin müxtəlifliyi, dalğaların güzgülərdən qayıtdıqda fazalarının dəyişməsi kimi bir sıra faktorlar qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasında faza uyunsuzluğuna gətirib çıxarır. Bütün bu faktorlar ümumi halda qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasında güclü faza modulyasiyasına və bu da öz növbəsində tezliyin çevrilmə effektivliyinin aşağı düşməsinə səbəb olur. Tədqiq olunan mühit lazer rezonatorunun xaricində yerləşdiyi haldan fərqli olaraq, rezonator daxilində qeyri-xətti mühitin kiçik həndəsi uzunluğunda tezliyin çevrilmə effektivliyini artırmaq olar. Xətti itkilərdən və mühit üzərinə düşən dalğanın gücündən asılı olaraq, rezonator da tezliyin çevrilmə effektivliyinin maksimal olması üçün dalğaların güzgüdən əks olunma əmsalı müəyyən qiymətə malik olmalıdır.

Ənənəvi həcmli qeyri-xətti mühitlər üçün tezliyin çevrilməsinin bu üsulu geniş tədqiq olunmuşdur [2-5].

İkinci üsul eyni bir optik elementdə həm məcburi şüalanmanın ola biləcəyi lazer mühitinin aktiv xüsusiyyətlərinin, həm də tezlik çevrilməsi prosesini nəzərdə tutan qeyri-xətti optik xüsusiyyətlərin uzlaşmasını nəzərdə tutur. Qeyri-xətti

mühit kimi nadir torpaq ionları (məsələn,  $Nd^{3+}$ ,  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ ) ilə aktivləşdirilmiş kristalların istifadə olunması və əsas dalğa mənbəyi kimi yarımkeçirici lazer diodlarının (məsələn, ATC-C1000-100-AMO, ATC-C1000-150-AMO) istifadəsi ən uğurlu variant olmuşdur [6, 7]. Bu cür optik qeyri-xətti mühitlərin tədqiqi indi də davam edir [8-11], lakin daha mükəmməl bircins qeyri-xətti kristalların texnoloji işlənməsi bu cür tezlik çeviricilərinin imkanlarını genişləndirməyə imkan vermədi. Optik dalğaların kvazisinxron qarşılıqlı təsiri baş verdiyi nizamlı domen strukturlarının (NDS) istifadəsi növbəti addım oldu. Məlum olduğu kimi, belə strukturda bir laydan digərinə keçid zamanı qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasında yaranan faza sürüşməsi layların sərhəddində polyarizasiya istiqamətinin sıçrayışlı dəyişməsi ilə kompensasiya olunur ki, bu da qeyri-xətti qavrayıcılığın işarəsinin əksinə dəyişməsinə uyğun gəlir. Beləliklə, sərhəddə faza sürüşməsinin kompensasiyası qeyri-xətti qavrayıcılığın periodik modulyasiyası hesabına baş verir, bu da fazalar fərqi  $\pi$  qədər dəyişməsinə ekvivalentdir [12].

Rezonator daxili çevrilmələrdə qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların eyni bir rezonatorun sərhədləri daxilində faza dəyişmələri çevrilmə effektivliyinə güclü təsir edəcək. Ona görə tədqiqatları sabit amplitud yaxınlaşmasından fərqli olaraq qarşılıqlı təsirdə olan bütün dalğaların faza dəyişmələrini nəzərə alan sabit intensivlik yaxınlaşmasında aparmaq məqsəddəyğündür [13]. Nizamlı domen strukturlarında tədqiqatların müasir vəziyyətinin təhlili bir sıra işlərdə aparılmışdır [6, 7, 14].

Hazırkı işin məqsədi - sabit intensivlik yaxınlaşmasında dalğaların kvazisinxron qarşılıqlı təsirini optik tezliklərin birinci üsulla rezonator daxilində çevrilməsi zamanı tədqiq etməkdir. Lazer rezonatoru daxilində yerləşdirilmiş kvadratik qeyri-xəttilyə malik domen-laylardan düzəldilmiş NDS-kristala baxaq.

Məcburi şüalanma nəticəsində lazerin aktiv mühitində  $\omega_1$  tezliyində lazer şüalanmasının generasiyası baş verir. Bu dalğa, NDS-kristalda yayılaraq  $\omega_2=2\omega_1$  tezlikli ikinci harmonika dalğasını həyəcanlandırır. Əsas tezlik dalğası üçün lazer rezonatoru bağlı hesab olunur, yəni  $R_1(\omega_1)=R_2(\omega_1)=1$ , burada  $R_{1,2}$ -sol və sağ güzgülərin əksətmə əmsallarıdır. İkinci güzgü həm də ikinci harmonika dalğasını tam əks etdirir. Harmonika dalğası güzgüdən əks olunduqdan sonra əsas şüalanma ilə birgə NDS-kristala qayıdır və orada dalğalar yenidən qarşılıqlı təsirdə olurlar. Kristalın tərk etdikdən sonra harmonika dalğası lazer rezonatorundan optik elementin köməyiylə çıxarılır.

NDS-də mühitdəki itkiləri nəzərə almaqla ikinci harmonikanın generasiyasını təsvir edən qısaldılmış tənliklər

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} + \delta_1 A_1 &= -i\gamma_1 A_2 A_1^* \exp(-i\Delta z), \\ \frac{dA_2}{dz} + \delta_2 A_2 &= -i\gamma_2 A_1^2 \exp(i\Delta z), \end{aligned} \quad (1)$$

şəklindədir, burada  $A_{1,2}$  - uyğun  $\omega_{1,2}$  ( $\omega_2=2\omega_1$ ) tezliklərində lazer dalğasının və ikinci harmonikanın kompleks amplitudları,  $\delta_j$  - udulma əmsalındır,  $\gamma'_j$  - qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların cüt sayda domenlər üçün uyğun  $\omega_j$  ( $j=1,2$ ) tezliklərində,  $\gamma_j$  - tək sayda domenlər üçün qeyri-xətti əlaqə əmsalları,  $\Delta = k_2 - 2k_1$  - hər bir domendə dalğaların fazalar fərqi.

Bu hal üçün sərhəd şərtləri

$$A_1(z=0) = A_{10} \exp(i\varphi_{10}), \quad A_2(z=0) = 0 \quad (2)$$

kimidir, yəni NDS-in girişində yalnız lazer dalğası mövcuddur. Burada  $z=0$ -birinci domenin girişinə uyğundur,  $\varphi_{10}$ -birinci domenin girişində əsas dalğanın başlanğıc fazasıdır.

Sabit intensivlik yaxınlaşmasında NDS-kristalda uyğun sərhəd şərtləri daxilində tezliyin ikiqat artması prosesi, girişdə güclü lazer dalğası olan hal üçün [13] işində ətraflı öyrənilmişdir. Ona görə aralıq hesablamaların üzərində dayanmayaaraq, dörd domendən ibarət domen strukturun çıxışında ikinci harmonika dalğasının kompleks amplitudu üçün ifadəni gətiririk [13]

$$A_2(l_4) = A_2(l_3) \left\{ \cos \lambda_4 l_4 - i \left( \gamma'_2 \frac{A_1^2(l_3)}{A_2(l_3)} + \frac{\Delta}{2} \right) \frac{\sin \lambda_4 l_4}{\lambda_4} \right\} \exp(-\delta_2 l_4 + i \frac{\Delta l_4}{2}), \quad (3)$$

haradaki

$$\lambda_4^2 = 2\Gamma_4^2 + \Delta^2 / 4, \quad \Gamma_4^2 = \gamma'_1 \gamma'_2 I_1(l_3).$$

Laylı strukturu tərk edərək, dalğalar lazer güzgüsündən əks olunaraq yenidən NDS-kristaldan keçir və orada qarşılıqlı təsirdə olur. NDS-kristalda yayılan dalğalar üçün əks istiqamətdə, yəni  $Z$  oxunun mənfi istiqamətində aşağıdakı sərhəd şərtlərini istifadə edək:

$$A_1(z=0) = A_1(l_4) \exp[i\varphi_1(2d) + i\varphi_{r,1}], \quad (4)$$

$$A_2(z=0) = A_2(l_4) \exp[i\varphi_2(2d) + i\varphi_{r,2}],$$

haradaki  $\varphi_1(2d)$ ,  $\varphi_2(2d)$  - NDS-kristal və 2 güzgüsü arasında  $d$  uzunluqlu hava aralığında harmonika və əsas dalğaların faza dəyişməsi,  $\varphi_{r,1}$ ,  $\varphi_{r,2}$  - 2 güzgüsündən əks olunarkən

$$A_2(l_5) = A_2(l_4) \left\{ \cos \lambda_5 l_5 - i \left( \gamma'_2 \frac{A_1^2(l_4)}{A_2(l_4)} + \frac{\Delta}{2} \right) \frac{\sin \lambda_5 l_5}{\lambda_5} \right\} \exp(-\delta_2 l_5 + i \frac{\Delta l_5}{2}). \quad (5)$$

almaq olar.

Qeyd edək ki, bu halda dördüncü və beşinci domenlər üçün qeyri-xətti əlaqə əmsalları eynidir və  $\gamma'_j$ -ə bərabərdir.

Domenlərin optimal uzunluqları halına baxacağıq, haradaki  $l_{j,opt}$   $\lambda_j l_{j,opt} = \pi / 2$ ,  $j = 1 \div 4$  şərtindən təyin olunur.

Onda [13]-dən  $\frac{A_1^2(l_4)}{A_2(l_4)}$  üçün ifadəni (5)-də yazsaq

dalğaların faza dəyişməsi,  $z=0$  strukturun girişinə uyğundur,  $A_1(l_4)$  - NDS-in çıxışında əsas dalğanın kompleks amplitududur.

Aydınlıq üçün NDS-kristalın indi əks istiqamətdə keçən domen-laylarını beşinci (əvvəl dördüncü), altıncı (əvvəl üçüncü) və s. ilə işarə edək, sanki NDS-kristal dörd deyil, səkkiz domendən ibarətdir. Lakin nəzərə alaq ki, dördüncü və beşinci domenlər arasında qeyri-xətti qavrayıcılığın işarələrinin dəyişilməsi pozulur, çünki bunlar eyni bir domendir. Bu iki domen, demək olar ki, uzunluğu dördüncü domenin uzunluğunun iki mislinə bərabər olan bir domen əmələ gətirir. Bu halda rezonator daxili çevrilmənin verdiyi əlavəni də nəzərə almaq lazımdır, yəni nəzərə alınmalıdır ki, dördüncü və beşinci domenlərin sərhədində dalğaların lazer güzgülərindən əks olması hesabına faza sürüşməsi baş verir.

Sabit intensivlik yaxınlaşmasında (4) sərhəd şərti daxilində (1) sistem tənliyini həll edərək, dördüncü domenin çıxışında, yəni dördüncü və üçüncü domenlərin sərhədində ikinci harmonika dalğasının kompleks amplitudu üçün (bu domen yuxarıda deyilənlərə əsasən beş nömrəsi ilə işarə olunub)

$$\begin{aligned} A_2(l_5) &= A_2(l_4) \exp(-\delta_2 l_5 + i \frac{\Delta l_5}{2}) \times \\ &\left\{ \cos \lambda_5 l_5 - i \left[ -\frac{\gamma'_2}{\gamma'_2} \left( \frac{\Delta}{2} - \frac{\lambda_4}{a} \right) e^{i\psi} + \frac{\Delta}{2} \right] \frac{\sin \lambda_5 l_5}{\lambda_5} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

alarlıq, haradaki,  $\psi = -\Delta l_4 - \varphi_2(2d) + 2\varphi_1(2d) - \varphi_{r,2} + 2\varphi_{r,1}$  - dördüncü domendə əsas şüalanma və harmonika dalğaları

arasında, NDS-kristalı ilə güzgü arasındakı hava layında və əksolma zamanı güzgüdəki fazalar dəyişmələrini müəyyən edir,

$$a = \frac{\frac{\Delta}{2\lambda_3} \frac{\Delta - \lambda_2^2}{\lambda_4} - \frac{\lambda_3}{\lambda_4}}{\frac{\Delta - \lambda_2^2}{\lambda_3}} + \frac{\Delta}{2\lambda_4},$$

$$\lambda_j^2 = 2\Gamma_j^2 + \Delta^2 / 4, \quad \Gamma_j^2 = \gamma_1' \gamma_2' I_1(l_{j-1}).$$

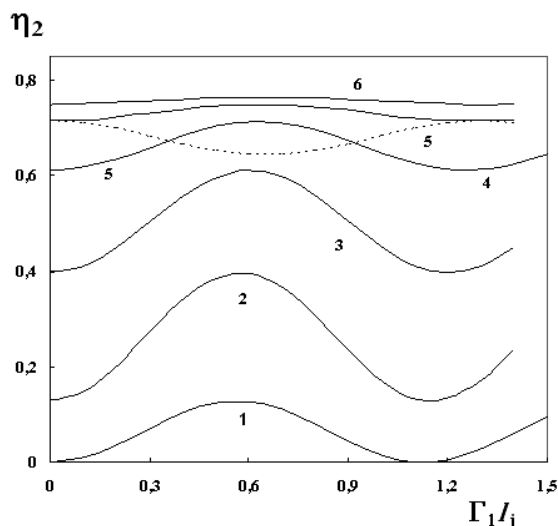
Alınmış ifadədən göründüyü kimi, harmonika amplitudası qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların fazalar fərqiindən  $\psi$  əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır və bu asılılıq ossilyasiya xarakteri daşıyır.

$$\eta_2(l_j) = I_2(l_j) / I_{10} \quad (7)$$

ifadəsi ilə təyin olunan çevrilmə effektivliyi, uyğun domenlaylardan çıxışda kompleks amplitudların sabit-intensivlik yaxınlaşmasında alınmış ifadələrindən istifadə etməklə hesablanıla bilər.

Şəkildə sabit intensiv yaxınlaşmasında hesablanmış rezonator daxili harmonikaya çevrilmə prosesinin nəticəsi göstərilmişdir. Əyrilər domenlərin  $l_{j,opt}$  optimal uzunluqları halı üçün qurulmuşdur (haradakı  $l_{j,opt} \quad j = 1 \div 4 \quad \lambda_j l_{j,opt} = \pi / 2$  şərtindən təyin olunur).

$\eta_2(l_j)$  çevrilmə effektivliyinin domenlərin gətirilmiş uzunluğundan  $\Gamma_j l_j$  asılılığı mühitdə itkilərin olmayan halı üçün göstərilmişdir. Əyrilərdən göründüyü kimi, asılılıqlar kəskin maksimuma malikdir. İlk dörd domenin koherent uzunluqları hesabına, nizamlı domen strukturunda harmonika dalğasının yayılması ilə effektivlik monoton artır (1-4 əyriləri). Lakin dalğalar güzgüdən əks olunduqdan sonra, yəni rezonator dağalar əks istiqamətdə yayıldıqda effektivliyin azalması müşahidə olunur (5 qırıq əyri), bu, güzgüdən əksolunma zamanı qazanılmış fazalar sürüşməsi ilə bağlıdır. Ancaq güzgülərin əksətdirmə əmsallarını seçməklə alınan faza sürüşməsini kompensasiya edərək, çevrilmə effektivliyinin sonrakı artımına nail olmaq olar (5 bütöv və qırıq əyrilərini müqayisə et). Effektivliyin bu artımı sonrakı domenlərdə yayılma zamanı da, məsələn, altıncı və s. domenlərdə davam edir (5 və 6 bütöv əyrilərini müqayisə et).



Şəkil.  $\eta_2(l_j)$  rezonator daxili çevrilmənin effektivliyinin domen-layların gətirilmiş uzunluqlarından  $\Gamma_j l_j$  asılılıqları. Hesablamalar sabit-intensivlik yaxınlaşmasında itkilərin olmadığı hal üçün, yəni  $\delta_j$ , və

$$\lambda_j l_{j,opt} = \pi / 2, \quad j=1 \div 4, \quad \Delta / 2\Gamma_j = 2.4 \text{ aparılmışdır:}$$

$\eta_2(l_j)$ -in birinci layın  $\Gamma_1 l_1$  gətirilmiş uzunluğundan (1 əyrisi),  $\eta_2(l_2)$ -nin ikinci layın  $\Gamma_2 l_2$  gətirilmiş uzunluğundan (2 əyrisi),  $\eta_2(l_3)$ -ün üçüncü layın  $\Gamma_3 l_3$  gətirilmiş uzunluğundan (3 əyrisi),  $\eta_2(l_4)$ -ün dördüncü layın  $\Gamma_4 l_4$  gətirilmiş uzunluğundan (4 əyrisi),  $\eta_2(l_5)$ -in beşinci layın  $\Gamma_5 l_5$  gətirilmiş uzunluğundan (5 bütöv və qırıq əyriləri),  $\eta_2(l_6)$ -nin altıncı layın  $\Gamma_6 l_6$  gətirilmiş uzunluğundan (6 əyrisi) asılılıqları. Hesablamalar optimal faza nisbətini iki qiyməti üçün

$$\psi = -\Delta l_4 - \varphi_2(2d) + 2\varphi_1(2d) - \varphi_{r,2} + 2\varphi_{r,1}$$

0 (5 qırıq əyrisi) və 3.14 (5 bütöv əyrisi) aparılıb.

Gətirilmiş asılılıqların ətraflı təhlili göstərir ki, NDS-kristaldan qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların təkrar keçidi hesabına çevrilmə effektivliyini artırmaq mümkün olur. Məsələn üçün baxılan halda məsələnin verilmiş parametrlərində çevrilmə effektivliyi 0,7-dən ~0,8-ə qədər və daha çox artır.

Beləliklə, harmonikanın rezonator daxili generasiyasının aparılmış təhlili göstərir ki, faza effektlərinin nəzərə alınması zəruridir. Bu effektlər lazer-rezonator da baş verən qeyri-xətti optik proseslərə güclü təsir edir. Rezonator daxili çevrilmədə qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasında optimal faza nisbətini və koherent uzunluqların uyğun qiymətlərini nəzərə alaraq layların uzunluğunu seçməklə nizamlı domen strukturunun çıxışında rezonatorsuz hala nisbətən daha yüksək çevrilmə effektivliyini almaq mümkündür.

- [1] I.R. Shen. Printsipi nelineynoy optiki, M., 1989, 560s. (in Russian)
- [2] V.G. Dmitriev, L.V. Tarasov. Prikladnaya nelineynaya optika, M., Radio i svyaz, 1982, 352s. (in Russian)
- [3] Z.A. Tagiev, R.J. Kasumova, Sh.Sh. Amirov. Optika i spektroskopiya, 1993, 75, 908-913. (in Russian)
- [4] Z.A. Tagiev, R.J. Kasumova, Sh.Sh. Amirov. E.M. Gamidov. Kvantovaya elektronika, 1994, 21, 968-970. (in Russian)
- [5] R.J. Kasumova, J. Opt. B: Semiclas. Opt., 2000, 2, 334-337.
- [6] G.D. Laptev, A.A. Novikov, S.A. Chirkin. Pisma v JETF, 2003, 78, 45-57. (in Russian)
- [7] N.V. Kravtsov, G.D. Laptev, I.I. Naumova, A.A. Novikov, V.V. Firsov, A.S. Chirkin. Kvantovaya elektronika, 2002, 32, 923-924. (in Russian)
- [8] A.A. Kaminskiy, D. Khake, S.N. Bagaev i dr., Kvantovaya elektronika, 1999, 26, 95-98. (in Russian)
- [9] C.Q. Wang, Y.T. Chow, W.A. Gambling et al., Opt. Commun., 2000, 174, 471-479.
- [10] P. Dekker, J.M. Dawes, J.A. Piper et al. Opt. Commun., 2001, 195, 431-437.

- [11] C.-L. Wang, K.-H. Lin, T.-M. Hwang et al. Appl. Optics 1998, 37, 3282-3287.
- [12] M.M. Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, and R.L. Byer. IEEE J. Quantum Electron., 1992, 28, 2631-2654.
- [13] Z.H. Tagiev, R.J. Kasumova, R.A. Salmanova, N.V. Kerimova. J. Opt. B: Quantum Semiclas. Opt., 2001, 3, 84-87.
- [14] Z.H. Tagiev, and R.J. Kasumova. Opt. Commun., 2008, 281, 814-823.

**R.J. Kasumova, A.A. Karimi**

### **INTRACAVITY QUASI-PHASE-MATCHED GENERATION OF OPTICAL FREQUENCIES**

The intracavity second - harmonic generation with taking into consideration of phase changes of all interacting waves is theoretically considered. It is obtained that harmonic amplitude at intracavity transformation essentially depends on phase relations of interacting waves  $\psi$  and has the oscillation character. Compensating the objectionable phase shifts it is possible to increase the transformation efficiency.

**Р.Дж. Касумова, А.А. Карими**

### **ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ КВАЗИСИНХРОННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ**

Теоретически рассмотрена внутрирезонаторная генерация второй гармоники с учетом фазовых изменений всех взаимодействующих волн. Получено, что амплитуда гармоники при внутрирезонаторном преобразовании существенно зависит от соотношений фаз взаимодействующих волн  $\psi$  и имеет осциллирующий характер. Компенсируя нежелательные фазовые сдвиги, можно значительно увеличить эффективность преобразования.

*Received: 09.10.09*