

光子回波的求解及其应用*

陆龙钊, 李 成, 余向阳

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 为了深入理解光子回波产生的物理机制, 通过采用预报-校正四阶龙格-库塔数值法求解非均匀展宽二能级体系的 Maxwell-Bloch 方程, 建立了准确计算薄样品和厚样品介质光子回波信号强度的方法。得到了二脉冲、三脉冲和多脉冲光子回波信号的强度特性, 并研究了弛豫时间、初始入射光脉冲的面积、失谐量以及样品的厚度等对光子回波信号的影响, 进一步研究了编码脉冲在数据存储和读取中的应用。计算结果很好地显示了光子回波信号的特性, 所建立的方法对光子回波信号的求解具有普适性。

关键词: 二能级体系; 非均匀展宽介质; Maxwell-Bloch 方程; 光子回波

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2013) 02-0014-05

Numerical Solution and Applications of Photon Echo

LU Longzhao, LI Cheng, YU Xiangyang

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Important applications in optical information storage and processing based on photon echo have been developed. An accurate and effective numerical method to solve the Maxwell-Bloch equations that are used to describe the optical pulse propagation and interaction with inhomogeneously broadened two-level medium will be introduced. Two-pulse photon echo is calculated then photon echo and multiple-pulse photon echoes are stimulated in optical thin (thick) media by using the method, and the physical properties of those echoes are analyzed. The results show that the approach to storage and retrieval of light using multiple-pulse photon echoes based on stimulated photon echo is an effective mode.

Key words: two-level system; inhomogeneously broadened medium; Maxwell-Bloch equations; photon echo

在非均匀展宽介质中, 两个相隔一定时间的强短激光脉冲与共振吸收介质相互作用后, 经过一定的时间后会自发辐射出一个光脉冲, 这个光脉冲就是所谓的光子回波。光子回波是强短激光脉冲与物质近共振相互作用所产生的相干瞬态效应^[1-2]。随着超短激光脉冲技术和量子光学理论处理方法的发展, 人们对光子回波进行了深入的研究, 并将其应用到了许多方面^[3-4]。激光脉冲与物质的相互作用, 在半经典理论框架下, 可用 Maxwell-Bloch (MB) 耦合方程描述^[5], 其中 Bloch 方程描述在光

场作用下的体系性质, Maxwell 方程则描述了光场在体系中的特性。用 Bloch 矢量模型可对光子回波现象作出清晰的经典的唯象解释^[2], 由此, 可以较好地理解光子回波的物理机制。但要完全描述和理解光子回波物理图像并定量地给出光子回波信号的强度, 则需要求解非均匀展宽体系的 MB 方程。MB 只在某些特定的条件下, 才能求得解析解, 通常情形需要采用数值求解的方法, 均匀和非均匀展宽体系 MB 方程数值算法都已经得到了很好的研究^[6-11]。本文在非均匀展宽体系 MB 方程数值解

* 收稿日期: 2012-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11274398); 广东省自然科学基金资助项目 (8151027501000062)

作者简介: 陆龙钊 (1987 年生), 男, 硕士研究生; 通讯作者: 余向阳; E-mail: cesyxy@mail.sysu.edu.cn

的基础上，建立了子回波信号的数 算法。应用 算法计算了薄 品近 和厚 品 下的二脉冲、三脉冲和多脉冲 子回波的信号，论了各种 素对 子回波的影响，并研 了多脉冲数 的 储与读的 。建立的计算 法高 可靠并有普适性。

1 基本理论

z 向传播的 场 $E(z, t) = \frac{1}{2} [\bar{E}(z, t) e^{-i\omega t} + c.c.]$ 作用于非 展 的二级体系，在电偶极近、慢变近 和旋转波近 下， 纲的 MB 程 [10]

$$\ddot{u}_i = -\Gamma_2 \cdot u - \Delta \cdot v \quad (1-a)$$

$$\dot{v}_i = -\Gamma_2 \cdot v + \Delta \cdot u + \Omega \cdot w \quad (1-b)$$

$$\dot{w}_i = -\Gamma_1 \cdot (w + 1) - \Omega \cdot v \quad (1-c)$$

$$\Omega_z + \Omega_i = \int_{-\infty}^{\infty} v(z, t, \Delta) g(\Delta) d\Delta \quad (1-d)$$

式中， u 、 v 、 w Bloch 矢 的分， u 、 v 分 映了与 场同相位的极化强度的 数部分和与 场相位 的虚数部分，分 表征了极化强度的色散和吸， w 上、下级的 居。 $\Omega = \mu \bar{E} / \hbar$ 拉比频， μ 电偶极跃迁矩阵元， \hbar 普朗克 数。 Δ 共振失谐； $\Gamma_1 = 1/T_1$ 、 $\Gamma_2 = 1/T_2$ ， T_1 、 T_2 分 纵向弛豫 间和横向弛豫 间。 $g(\Delta)$ 非 展 的线型函数。式 (1) 是以有 间 $\tau_0 =$

$\sqrt{\frac{2\hbar^2}{N\mu_0 c^2 |\mu|^2 \omega}}$ 进行 级化的，其中， c 是在真

中的速，是真 中的电磁系数，是介质的线性折射， N 体系的密度。

在薄 品近 下，可 场对体系的作用，而忽略 场在介质中的传播 应， 场 间变化，就可 转到射 场前进的 系中，式 (1-d) 可得薄 品后 的 场

$$\Omega(L) = L \int_{-\infty}^{\infty} v(z, t, \Delta) g(\Delta) d\Delta \quad (2)$$

上式可，对 知线型函数 $g(\Delta)$ 的介质，出 v 后，便可 出 作用于介质后的 场强度，然 场强度与 品的厚度 L 比。 v 可 程 (1-a) ~ (1-c)，Bloch 程 得，是一 非线性 微分 程，里采用文献 [7] 建立的校 阶龙格 - 库塔 (RK4) 法进行数 。

(2) 式就可计算薄 品近 下 子回波信号的强度。而 子回波的唯一象 析 是基于薄 品近

在 Bloch 矢 模型上得出的。

通，子回波的 品都是有一 厚度的吸 介质， 场在通过吸 介质，介质厚度 然会强烈影响 场的传播 性^[11-12]。而对 条件下的 子回波的 性而言，薄 品近 虽然可以 析一 象， 然是一个 好的近 品的厚度， MB 耦合 程 (1)， 得到体系与 场的性质， 程 (1) 是一 非线性偏微分 - 分 程，其 是复杂的，里我们在前期工作的基础上，采用文献 [10] 建立的“预报 - 校 阶龙格 - 库塔 (PCRK4)”法建立了厚 品 子回信号强度的 案。初 条件 知，就可计算厚 品中 子回波信号的强度。

2 计算结 与 论

数 计算 程 (1) 的初始条件：

$$u|_{t=-\infty} = 0, v|_{t=-\infty} = 0,$$

$$w|_{t=-\infty} = -1, \Omega|_{t=-\infty} = 0 \quad (3)$$

条件 初始 射脉冲，假 脉冲 高 型的，有

$$\Omega|_{z=0, t} = \sum_{i=1}^n \Omega_{0i} e^{-(2\ln 2/t_{pi}^2)(t-t_{0i})^2} \quad (4)$$

式中： Ω_{0i} 、 t_{pi} 和 t_{0i} 分 第 i 个脉冲的峰、高 和脉冲中；如 初始 射脉冲的面 S_{0i} ，有 $\Omega_{0i} = S_{0i} \cdot \sqrt{(2\ln 2)/\pi}/t_{pi}$ 。

介质的非 展 线型 $g(\Delta)$ 假 高 型，其归一化的形式

$$g(\Delta) = \sqrt{2\ln 2/(\pi\Delta_d^2)} e^{-(2\ln 2/\Delta_d^2)\Delta^2} \quad (5)$$

式中， Δ_d 高。

2.1 二脉冲光子回波

两个相隔 间 $t_1 = t_{02} - t_{01}$ 的强短激 脉冲 与共振吸 介质相互作用后，过 t_1 的 间后会观测到 介质自发辐射出的一个 脉冲，就是二脉冲的 子回波。薄 品近 下双脉 子回波信号，在 条件下，过适 的近，可得到回波信号的 析^[13]，虽然 析 可以 好 释 子回波形的 理机制， 给出 的 结。了 给出 子回波信号的强度，就 采用数 法进行，以便 而全面地描述 子回波的 形 机制及影响信号强度的 素。

1 了共振 ($\Delta = 0$) 忽略了弛豫 间 ($\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = 0$)，薄 品近 下二脉冲 子回波信号的强度。计算 各参数： $L = 1$ ， $t_{p1} = t_{p2}$

$= 1, \Delta_d = 3, t_{01} = 5, t_{02} = 15, S_{01} = \pi/2, S_{02} = \pi$ 。图 1 中点线是输入光脉冲 ($z = 0$) 的强度, 实线是样品后边界处 ($z = L$) 光场的强度。从图中可以看出: 在第二个脉冲作用后, 经过 t_1 时间间隔, 出现了光子回波。这个结果与解析解及矢量模型^[5]分析是一致, 也说明了所建立的数值算法是可靠性。

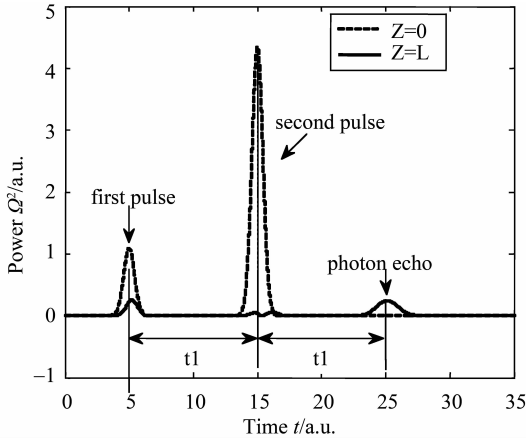


图 1 光学薄样品中的二脉冲光子回波

Fig. 1 A two-pulse photon echo in optically thin media

虽然解析解的结果可以得到二脉冲光子回波强度以及退相时间对光子回波强度的影响, 但 MB 方程中的其它参数, 诸如失谐量、驰豫时间、非均匀展宽线宽以及激发脉冲的强度等, 对光子回波信号强度的影响是解析解所不能完全给出的, 而用数值求解的方法, 可以计算各种参数对光子回波信号强度的影响。

图 2 (a) 显示了退相时间 T_2 对光子回波信号强度的影响。从图中可以看出光子回波信号的强度随着 T_2 的增大而迅速增大, 当 T_2 大过一定值后光子回波强度增加变慢, 最后趋向于平缓。这是由于 T_2 越小, 退相过程就越快, 经过第二个脉冲作用后偶极矩相位能够反向趋于一致的数目越少, 因此光子回波的强度就较小; 反过来, T_2 越大, 退相过程越慢, 偶极矩相位能够反向趋于一致的数目越多, 因此光子回波强度就较大。当 $T_2 \geq t_1$ 时, 在 t_1 时间内 T_2 对退相过程的影响可以忽略, 光子回波强度趋于定值。光场载波频率与共振频率的失谐也会影响光子回波的强度。图 2b 给出了失谐量对光子回波强度的影响。从图中可以看出: 失谐量绝对值越大, 光子回波信号的强度越低, 整个曲线以 $\Delta = 0$ 为对称分布, 说明正、负失谐的影响是相同的。

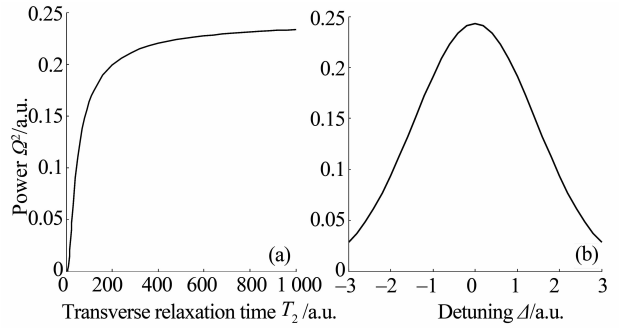


图 2 退相时间 (a) 失谐量 (b) 对光子回波强度的影响

Fig. 2 Peaks of echo power for different transverse relaxation times (a) relaxation times and (b) detunings

图 3 显示了厚样品的光子回波强度的三维图, 计算的参数与图 1 相同。从图中可以看出, 两个入射脉冲的强度随介质厚度的增加而减小, 光子回波信号的强度则随介质厚度的增加先增大后减小, 这意味着实现最强的光子回波与介质的厚度的选取有关。在时间坐标上, 光子回波出现的位置与薄样品近似下是相同的。

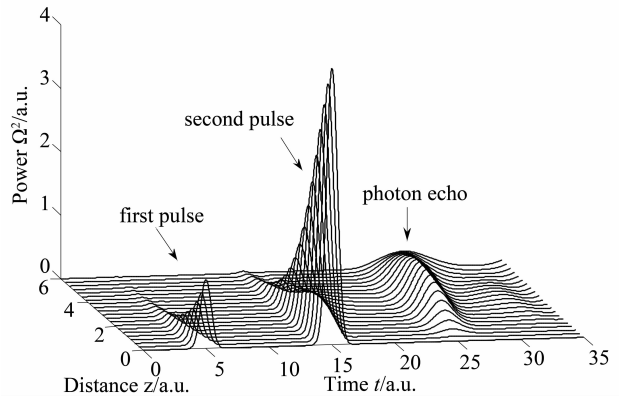


图 3 光学厚样品中的二脉冲光子回波

Fig. 3 A two-pulse photon echo in optically thick media

2.2 三脉冲光子回波

在三脉冲作用下, 光子回波的特性变得复杂, 已无二脉冲光子回波那样清晰的物理图像。三脉冲光子回波也被称为受激光子回波。其中, 第一个输入脉冲称为“写”脉冲, 它的作用是实现介质中原子基态与激发态间的相干; 随后输入的第二个脉冲称为“数据”脉冲, 它的作用是将相干性传递给基态与激发态间频率依赖的“数据”脉冲, 此时“数据”脉冲的信息也被存储在介质中; 然后在某个时刻输入第三个脉冲, 称之为“读”脉冲, 这个脉冲的作用是激发光子回波^[14]。

图 4 是在薄样品近似下，三脉冲光子回波的计算结果。三个脉冲的入射脉冲面积分别为 $S_{01} = \pi/2$ 、 $S_{02} = 0.1\pi$ 和 $S_{03} = \pi/2$ ，脉冲的时间间隔为 $t_1 = t_{02} - t_{01} = 10$ 和 $t_2 = t_{03} - t_{02} = 20$ ，其他计算参数与图 1 相同。从图中可以看出，在第三个入射脉冲作用后，经过时间 t_1 后会出现一个脉冲，这个脉冲称为受激光子回波。

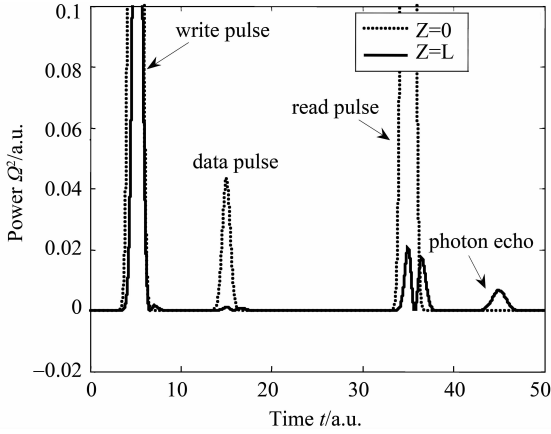


图 4 光学薄样品中受激光子回波

Fig. 4 A stimulated photon echo in optically thin media

图 5 给出了厚样品中的受激光子回波强度的三维图，除样品空间参数外，所选其它参数与图 4 同。从图中可以看出，三个入射脉冲的强度随介质厚度的增加而逐渐变小，光子回波强度随介质厚度的增加先增大后减小，其它性质与薄样品近似下受激光子回波的特性是一致的。受激光子回波携带了第二个输入脉冲，即数据脉冲的信息，这一点在多脉冲光子回波中会体现的更明显。

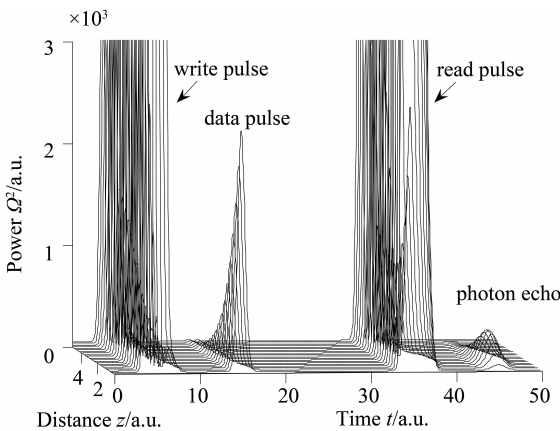


图 5 光学厚样品中受激光子回波

Fig. 5 A stimulated photon echo in optically thick media

2.3 多脉冲光子回波

图 6 显示了多脉冲入射时所产生的光子回波，写脉冲的面积为 0.5π ，每个数据脉冲的面积为 0.025π （组成编码 11101101），读脉冲的面积为 0.5π ，写脉冲与第一个数据脉冲间的时间间隔为 20，最后一个数据脉冲与读脉冲间的时间间隔为 70。从图中可以看出，薄样品近似下光子回波所携带的信号编码与数据脉冲的编码完全相同^[15]，读出时间间隔与写入时间间隔一致。图 7 给出了厚样品中多脉冲入射的情况下的光子回波的计算结果。

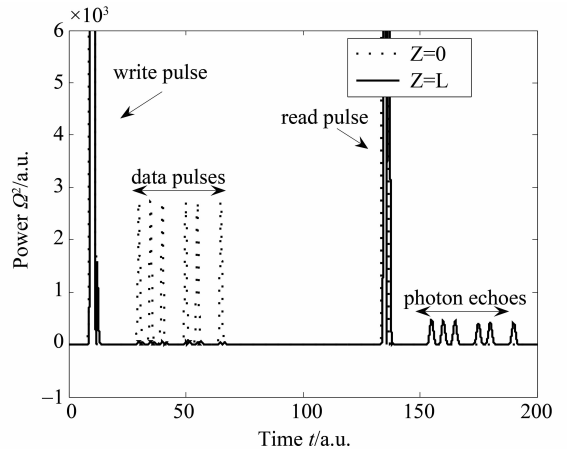


图 6 光学薄样品中多脉冲光子回波

Fig. 6 A multiple-pulse photon echoes in optically thin media

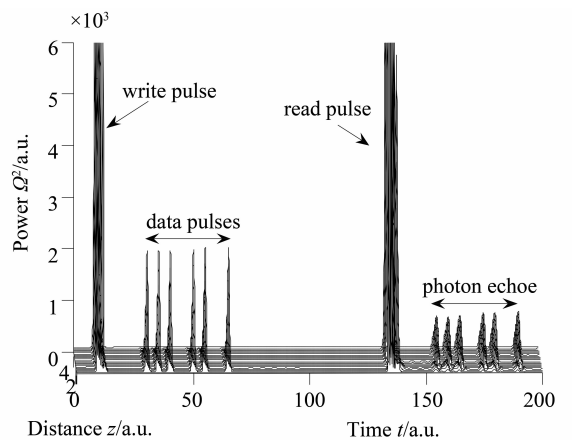


图 7 光学厚样品中多脉冲光子回波

Fig. 7 A multiple-pulse photon echoes in optically thick media.

如果将二脉冲入射情况下的第一个脉冲改成多个数据脉冲（每个“数据”脉冲的面积为 0.025π ，“读”脉冲为 π ），组成编码 11101101，

则得到的光子回波如图 8 所示。此时最后一个“数据”脉冲与“读”脉冲间距,与“读”脉冲与第一个光子回波间距相同,这个性质与二脉冲光子回波相同,并且光子回波所对应的编码为 10110111,与数据编码顺序正好相反。

编码数据的存储与读取在时间轴上是满足一定规律的:图 7 显示编码数据的存储与读取与受激光子回波脉冲间隔一致,而图 8 给出的编码数据存储与读取与二光子回波脉冲间隔一致,都可用于实现光脉冲信号的存取。编码数据脉冲光子回波的这种特性,是实现光脉冲数据存储与读取的有效方式之一。

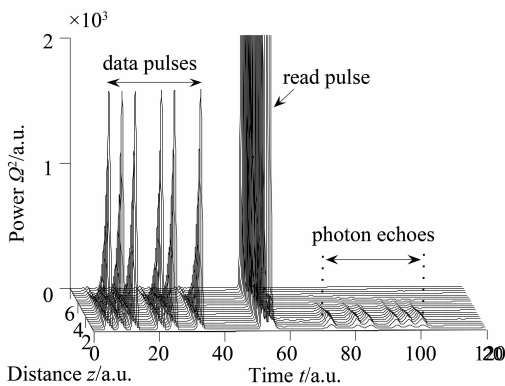


图 8 光学厚样品中多脉冲光子回波

Fig. 8 A multiple-pulse photon echoes in optically thick media

3 结 论

光子回波信号的数值解法是在非均匀展宽二能级体系 MB 耦合方程数值算法的基础上建立的。在光学薄样品近似条件下,数值计算了二脉冲光子回波与三脉冲光子回波,与解析解的结论是一致的,表明所建立数值解法是可靠性的,并讨论了弛豫时间对光子回波信号的影响。进一步计算了厚样品情况光子回波信号,讨论了介质厚度对光子回波强度的影响,结果表明光子回波的强度随介质厚度的增加先增大后减小,这意味着有最佳的介质厚度实现最强的光子回波信号。编码数据脉冲的光子回波是实现光脉冲数据存储与读取的有效方式之一,并满足一定的规律。本文就存取时间间隔、编码顺序等进行了初步研究,对编码数据脉冲光子回波的更深入的研究,诸如实现多比特编码数据脉冲的有效可靠存取等,将在后续工作的进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] KURNIT N A, ABELLA I D, HARTMANN S R. Observation of a photon echo[J]. Phys Rev Lett, 1964, 13: 567.
- [2] ABELLA I D, KURNIT, HARTMANN S R. Photon echoes[J]. Phys Rev, 1966, 141:391.
- [3] BOYE D M, FEOFILOV S P, MELTZER R S. Two-pulse photon echo studies of optical dephasing in $\text{CaF}_2: \text{Eu}^{2+}$ [J]. J Lumin, 1998, 76/77: 60 - 63.
- [4] OLSON R W, LEE H W, PATTERSON F G, et al. Optical density effects in photon echo experiments[J]. J Chem Phys, 1982, 76(1): 31 - 39.
- [5] ALLEN L, EBERLY J H. Optical resonance and two-level atoms[M]. New York: Dover, 1987.
- [6] 余向阳, 周建英. 飞秒相干瞬态过程的 Bloch 方程描述[J]. 中山大学学报:自然科学版, 1999, 38(2): 24 - 27.
- [7] 郭莹莹, 余向阳. 光学 Bloch 方程的数值解法[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2005, 44(5): 108 - 110.
- [8] 蒋月, 余向阳. 二能级体系 Maxwell-Bloch 方程的数值求解及其应用[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007, 46(s2): 176 - 179.
- [9] 张华荣, 蒋月, 李成, 等. 均匀展宽介质中激光超短脉冲面积的演化规律[J], 光子学报, 2009
- [10] 李成, 张华荣, 余向阳. 非均匀展宽体系 Maxwell-Bloch 方程的求解[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2009, 48(4): 36 - 41.
- [11] YU X Y, LIU W, LI C. Near-resonant propagation of short pulses in a two-level medium [J]. Phys Rev A, 2011, 84:033811.
- [12] AZADEH M, CORNISH C S, BABBITT W R, et al. Efficient photon echoes in optically thick media[J]. Phys Rev A, 1998, 57:4662.
- [13] TSANG L, CORNISH C S, BABBITT W R. Analytic solutions of the Maxwell - Bloch equations for high photon-echo efficiency of multiple pulse sequences [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20:379.
- [14] STAUDT M U, HASTINGS-SIMON S R, NILSSON M, et al. Fidelity of an optical memory based on stimulated photon echoes[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98:113601.
- [15] LUO B, ELMAN U, KRÖLL S, et al. Amplification of photon echo signals by use of a fiber amplifier[J]. Opt Lett, 1998, 23:442.