

枯井发声与地震前兆*

——万泉庄一枯井发声的初步研究

吕如榆

(中国科学院物理研究所)

1976年7月28日唐山、丰南一带发生强烈地震前后,北京市海淀区海淀公社万泉庄大队第三生产队的一口枯井,突然发出有地震前兆迹象的响亮声响。这一异常现象,引起了有关单位的重视,我们也参加了实地研究和检测。

我们对声响的频谱作了分析,对发声机理和影响因素进行了研究,向当地贫下中农和有实际经验的老农作了多次调查访问,并且与有关的化学、地质、地震人员进行了讨论。在这个基础上得到了一些资料和结论。

一、枯井发声规律与地震的关系

万泉庄枯井,位于万泉庄西南100多米的稻田中央。井在1972年初打成后一直上水,水质清晰。到1975年底开始无水,成为枯井。枯井地下部分深7.8米,用直径5厘米钢管打入地下,尖端呈圆锥状,底有30厘米“花管”(管壁上穿孔以供透水,详见图1)。地面部分高1米,约半米是地下钢管(直径5厘米)延伸成的,上焊直径10厘米高20厘米的钢管,顶部是直径12厘米、高30厘米的钢管。在10厘米和12厘米的钢管之间,焊有一挡板,板上打有5个小孔,每孔直径约1.3厘米。

枯井发声总共有三次。第一次是在1976年7月26日下午开始发声,初较轻,后逐渐增高,至27日晚11时半停止。第二次是在28日9时开始发声,声音一开始就很响,后逐渐减弱,至30日5时半停止。其声响一般是下午和晚上较响,深夜和上午较轻。第三次在8月8日6时许开始发声,这一次发声同第二次之间间隔约9天,其声响开始时中等,至8日晚升高,晚11时左右排出的气体有明显的酱油味,至9日3时杂有水泡声,到9时25分声音停止。这三次发声的强弱变化情况,在图2上部用虚线示出。

在图2的下部示出了在这个期间内,冀东地区发生的强度在5级以上的地震情况。

比较图2上部枯井发声的情况同图下部爆发地震的时间,可以明显地看出其间的相关性。在第一次声响停止后约4个半小时,唐山、丰南地区发生了7.8级

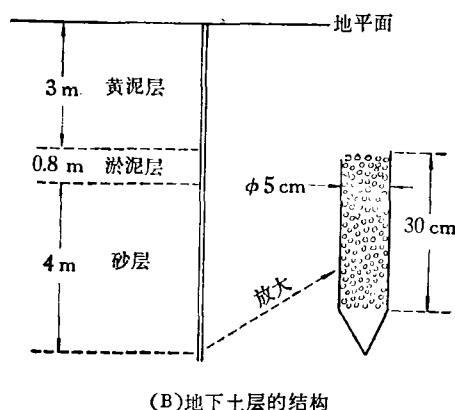
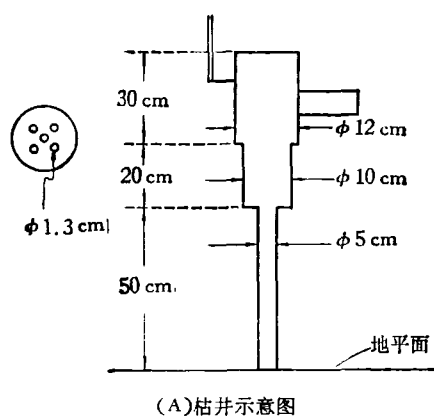


图1 枯井示意图和地下土层的构造

的强烈地震,其后接连多次发生6级以上的余震。在第二次发声后约10小时,又发生了7.1级的强烈余震,而后又有几次余震。在8月8日开始发声后,又出现二次6级以上强余震。每次发声后都伴随着发生强烈地震,而且特别值得注意的是,在7月31日到8月8日这段长达9天的时间内,枯井不发声,也没有发生任何5级以上的地震。由此可见,枯井发声的规律同强地震爆发时间之间,存在着很好的相关性。只就这种相关性来看,这口枯井的发声规律,可以认为有作为地震前兆的价值。

* 1977年3月收到。

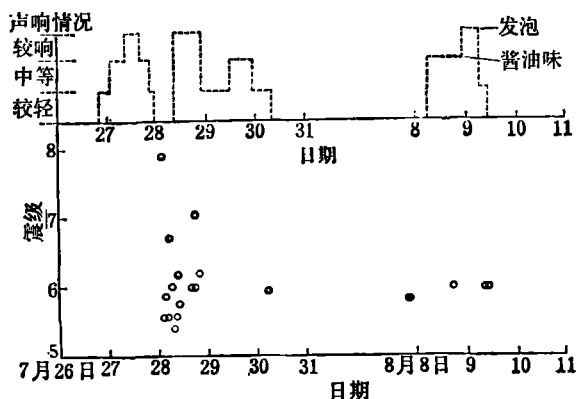


图2 枯井声响与震级的关系

二、枯井声响的特性

枯井发出的声响，根据录音进行了频谱分析。分析是按声学测量的常规方法进行的，不过有两点要加以说明。第一，分析时采用倍频带滤波器，不用1/3倍频带或更细的滤波器，这是由于前者可以去掉声响中一些次要的性质，突出它的主要特性，便于同常见的典型噪声谱进行比较。第二，分析的结果已根据录音折合绝对值。这就是说，结果的分贝值，是枯井发声(较响)时靠近井台处的实际分贝数。

分析的结果示于图3。声谱曲线在250赫有一主峰，主峰以下约以每倍频程12分贝的速率下降，主峰以上约以每倍频程8分贝的速率下降，这个特性接近于在露天条件下空气喷气声的声谱曲线。

为了便于比较，在图3上也示出了在露天条件下空气喷气声的频谱。这个理论曲线是由大量实测数据归纳而得，并经理论分析的典型曲线。

空气喷气声的典型频谱曲线，有三个主要特性。第一，曲线有一个主峰，主峰的频率主要由喷口尺寸和喷气流速决定，即

$$f_0 = \frac{5v}{d}, \quad (1)$$

式中， f_0 ——声谱曲线的主峰频率(赫)，

v ——喷气流速(米/秒)，

d ——喷口直径(米)，

S ——常数，通常称为斯脱罗哈耳(Strouhal)

数。在一般情况下 S 可取0.2。

对万泉庄枯井来说，喷口的等效直径大约是3厘米，如果谱峰频率在250赫，则估计流速约为38米/秒，这同实际观察到的喷射高达1.5—2.5米的情况相符合。

第二个特点是，频谱的主峰两边的声级以不同的速率下降，低频部分下降率要高于高频部分。低频大约是6到8分贝；高频大约是2到4分贝。如果我们

把这个性质同万泉庄枯井的声谱曲线作一比较，就可看出，总的形状和趋势是相同的，但曲线两边的斜率有所不同。下一节我们将要进一步讨论枯井声响同理想喷气声的异同。

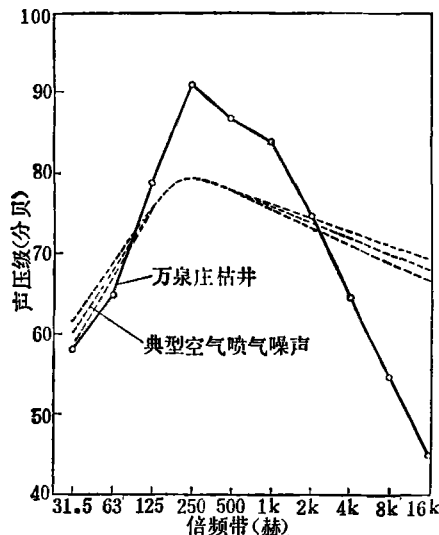


图3 万泉庄枯井发声的倍频带频谱(实线所示)和理想空气喷气声的典型频谱(虚线所示)。枯井声频是在井口上部开端附近测得的，总声压级为94分贝，A声级、B声级和C声级分别为89分贝、93分贝和94分贝。

空气喷气声的第三个特点，是它的声功率可由下式估算¹⁾

$$W_A = K \frac{\rho_1^2 v^5 A}{\rho_0 C^5} = K \rho_0 M^5 v^3 A, \quad (2)$$

式中， W_A ——空气喷气产生的声功率(瓦)，

ρ_1, ρ_0 ——分别代表喷气和环境大气的密度(公斤/米³)。在喷口流速不太高时， ρ_1 和 ρ_0 可以近似认为相等，即等于1.2公斤/米³，

v, C ——分别代表喷口流速和声速(米/秒)；其比值 $M = v/C$ 称为马赫数，

A ——喷口面积(米²)，

K ——喷气发声效率常数；对 M 小于0.5以下的喷气， K 约为 1.5×10^{-4} 。

声功率级可以表示为

$$L_W = 82 + 10 \log \rho + 50 \log M + 30 \log v + 10 \log A, \quad (3)$$

式中， $L_W = 10 \log(W_A/W_0)$ ， W_0 是基准声功率，按规定 $W_0 = 10^{-12}$ 瓦。换算成声压级就是

$$L_P = L_W + D - 10 \log 2\pi r^2 \quad (\text{分贝}). \quad (4)$$

式中， r ——离喷口的距离(米)，

L_P ——离喷口上距离上的声压级(分贝)，

1) 这是把喷口辐射看作四极子辐射器导出的，它适用于亚声速、空气湍流喷射的理想情况。

D ——井口声辐射的指向性指数。考虑到喷口向半空间辐射,可取这个指数为 6。

如果把表 1 列出的万泉庄枯井具体情况下的声学常数,代入(3)式和(4)式,我们就可以求出靠近井台附近的声压级 71 分贝。实际在靠近井口处的总声压级约 94 分贝(参见图 3 上所示),比理论估算的数据要高。这个差别,在下一节中再作进一步分析。

表 1 万泉庄枯井发声有关的声学数据

名称	符号	数值	单位
喷口有效直径	d	0.03	米
喷口等效面积	A	7×10^{-4}	米 ²
斯脱罗哈耳数	S	0.2	无量纲
空气密度	ρ_0	1.2	公斤/米 ³
喷口流速	v	38	米/秒
喷气发声效率常数	K	1.5×10^{-4}	米公斤秒制
声速	C	340	米/秒
马赫数	M	0.106	无量纲
井口声辐射指向性指数	D	6	无量纲
基准声功率	W_0	10^{-11}	瓦

三、枯井声响的进一步分析 ——共振现象

上一节我们比较了枯井声响同理想喷气声的特性,可以看出它们之间的异同。它们的声谱都具有一个主峰,在主峰两边都以相似的斜率衰减,高频端的衰减率小于低频端。从这些共同点,我们可以肯定,枯井声响就其特性讲,是属于喷气声一类的。

主要的差异有两点:第一,衰减的斜率虽然相似,但井声要比理想喷气声的衰减率,不管在高频还是低频,都要高一些。第二,在频谱的主峰附近,实际测得的声压级要比理想喷气声估算的高。固然,就目前技术水平来说,从理论上估算喷气声的谱级,由于影响因素较多,精确度还不高(约在 ± 5 分贝),但差别达 20 多分贝,肯定超出估算的可能误差范围了。另外,在远离主峰频率,实际声级又要比理论值低些。

这两个差别表明,万泉庄枯井的声响,存在着共振现象。因为正是由于存在共振,使共振频率附近的声能相对集聚,使共振峰附近的声级就比不存在共振时要相对增强了。共振时,至于声波在共振体内来回反射而逐渐累积声能,往往会在共振体内产生很强的驻波。引起管壁振动。万泉庄枯井发声时,井壁可以感觉到有麻手的振动,也可以用来证明共振的存在。共振的现象特别在主峰频率同共振体的固有频率吻合时最为显著。

现在,我们来考察一下井管各部分的固有频率。这种圆柱形管腔有两组固有频率:径向固有频率和纵向

固有频率。径向固有频率的基频 f_{r1} 由 $0.766(C/2a)$ 决定, a 是管腔的半径。对万泉庄枯井的井管来说,有三种半径:2.5 厘米,5.0 厘米,6.0 厘米(见图 1)。用最大半径 6 厘米代入,算出基频也有 2120 赫,其他应当更高(详见表 2)。因此,对我们这个情况,不存在径向共振。

表 2 万泉庄枯井各部位的固有频率

径向固有频率 $f_{r,n} = (2n-1)\frac{C}{4a}$ (赫)			纵向固有频率 $f_{l,n} = (2n-1)\frac{C}{4l}$ (赫)	
$a = 0.06$ 米	$a = 0.05$ 米	$a = 0.025$ 米	挡板以下 ($l = 7.8$ 米)	挡板以上 ($l = 0.35$ 米)
2,100	2,550	5,100	10.9	250
5,000	5,950	11,900	33	750
7,800	9,350	18,700	55	1,250
10,600	1,280	25,500	76	1,750
13,500	1,610		98	2,250
16,300	1,950		120	2,750

再看井管的纵向固有频率。因为井管中间有一挡板,因此井管被分成两部分:挡板以上的管道和挡板以下的管道。这两部分都可以看作“一端开一端闭”的管腔,纵向固有频率 $f_{l,n}$ 是

$$f_{l,n} = (2n-1)\frac{C}{4l}, \quad (5)$$

式中, $f_{l,n}$ ——末端一开一闭的管腔的固有频率(赫);

注脚“ n ”是取 1, 2, 3, ……的整数,

l ——管道的有效长度(包括了开端的末端修正值)(米),

C ——声速(米/秒)。

挡板下的井管,长 7.8 米,代入(5)式求出纵向固有频率是 $f_{l1}: 10.9; f_{l2}: 33; f_{l3}: 55; \dots$ (见表 2)。要固有频率在 250 赫, n 应高达 13, 在这样高阶的情况下,固有频率间隔很狭,很密集,往往不太有可能产生单频或狭频带范围的强共振。这就是说,共振现象不可能产生在挡板以下的井管壁腔内。对挡板以上的管腔,长 0.3 米,直径 12 厘米,因此有效长度 l 约 0.35 米,代入(5)式算出固有频率为(详见表 2):

$$f_{l1} = 250 \text{赫}, f_{l2} = 750 \text{赫}, \dots$$

顶端管腔的纵向基频 $f_{l1} = 250$ 赫,正同喷气声的主峰吻合,这是共振产生的主要部位。这同发声时的现场观察也是符合的,在顶端井口部位振动最强,麻手最甚。

从上面的分析可以肯定,万泉庄枯井声响就其本质来讲是喷气声,但由于喷气声主峰频率同井口管腔的固有基频吻合,产生了强共振,使吻合频率附近的声能集聚,主峰更突出,声强就比“理想的”(无共振时)喷气声要高出了很多了。万泉庄枯井之所以发出如此大的声响,使离开井位两三百米远的地方也能听清,共振

是一个重要的原因。

这就启示我们，共振现象在有关声音的地震预报和预测工作中，至少有两方面的应用价值。在已证实有地震前兆价值的水井或枯井中，可以装置共振器作为地震的预报器；在已知地声的频率或频带的情况下，可以利用共振现象作为讯号的放大器、检别器或抗干扰器。

四、发声机制与地震前兆

万泉庄枯井的声响，既然是由于气体通过挡板上的小孔产生的喷气声，现在要问：这些气体是什么地方来的？同地震有什么关系？

万泉庄枯井位在稻田中央，地势低洼。根据现场调查和访问，特别向直接参加这口井打井的老农调查¹⁾，知道这一地带的地下土层构造如图 1(b)所示。表层是黄泥层(耕土层)，厚约3米(指枯井所在处的厚度，附近约在2—5米的范围内)。表层下面是淤泥层，厚约0.8米(附近约在0.5—1.5米)，这一层不透水又不透气(因此这一带适宜于种植水稻)。再下是一层厚约4米的砂层(周围厚度约在3—6米之间)。底层是砾石层。在1975年底以前，地下水位在砂层，所以此井能上水，后来地下水位下降至砾石层，这个井就变成枯井了。

在7月28日和8月8日前后，地下水位突然上升，压缩砾石层和砂层中贮存的气体。由于砂层上是一层淤泥层，既不透水又不透气，气体的压力就骤然上升，向井口以喷射的方式泄出²⁾，喷注通过挡板上的小孔，就产生了喷气声。这就是枯井发声的成因。

从枯井喷出的气体，经过化学分析证明，成分与正常大气显然不同，最明显的差别是二氧化碳和氧气的含量。正常大气的二氧化碳含量在千分之几以下，但冒出的气体中二氧化碳高达百分之十四，约占总气体的七分之一。氧气正常含量是百分之二十，但冒出的气体中只占百分之三。这就证明，冒出的气体确实是来自地下的。图4示出了8月8日到12日这一段包括枯井发声期和停息期中二氧化碳和氧的含量变化的规律。在发声期间，二氧化碳和氧的含量偏离正常值最大，在停息一段时间后，含量就逐渐接近正常值了。这进一步证明，引起枯井发声的喷气确实是由于地下水位变动压缩地下气体造成的。

这里提出一个问题，到底是什么原因导致地下水位的上升呢？一种说法是由于两季下雨量大，地下水位就升高；另一种解释是由于地震前，地层有变动导致地下水位上升。

第一种说法，看来有点道理，七、八月份确是北京雨季，下雨量大，容易使地下水位升高。但进一步分析证明，这种说法是站不住脚的。第一，1976年北京的下雨量不是最大的一年，特别没有非常集中的暴雨期。

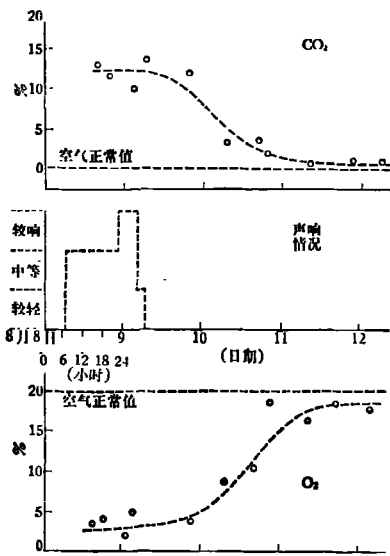


图4 喷气的二氧化碳和氧成分与发声的关系

即使在雨量最大的年头，也没有发生过这种地下水位突然上升，把地下气体压缩成高压状态以喷射形式冒出的现象，因此，用下雨量来解释是说不通的。第二，如果说地下水位上升是由于下雨量造成，那么，必然经过雨水逐渐渗透导致至地下水位上升这样一个逐渐变化的过程，但就枯井的情况来说，肯定是地下水位突然上升，才有可能产生如此大的高压气体。如果是渐变过程，则由于周围地层的缝隙相互沟通，逐渐平稳，地下气体达不到这样高的压力状态。第三，下雨量和枯井发声之间，也没有什么关联性。据气象部门对这段时间的下雨量统计，在7月19日到21日之间雨量比较集中，但尔后的六天时间内枯井并没有冒气发声，发声是在7月26日到27日出现的。相反，在发声后的28日到29日又出现较集中的雨量，而在以后的29日到8月8日这段长达10天的时间并没有发声。这足以证明，决不是雨量引起地下水位上升。

第二种解释，即地震前由于地应力变动，造成地层相对变动而使局部地带地下水位上升，这是有充分理由并且唯一能成立的原因。除了前面我们已讨论到的“枯井发声同地震之间有密切的相关性”以外，还有如下一些重要原因。第一，地震前地应力有明显变化并发生地层相对移动的区域，往往出现在地层断裂带附

- 1) 这一带在前清时期原是一片沼泽，到解放初期还保留着很多零星的长满蒿草的沼泽地带，在1958年大跃进时期才全部改造成稻田。这一带原来有很多泉水溢出(故庄名有“万泉”之称)，只由于后来采用了大量电力排灌系统，致使水位下降，到1965年才无泉水出露。
- 2) 在附近约50米的稻田中，在枯井发声的同时发现有几处气体从地裂缝中冲出，发出咪咪的声音，估计这是由于地下高压气体冲破薄弱的淤泥层喷出的结果。

近,而万泉庄枯井的位置,根据地质部门调查,正是位在八宝山断裂带上。八宝山断裂带的走向是从八宝山开始,向东北方向经过万泉庄枯井所在位置,穿过海淀镇,向清河东北方向延伸。因此,万泉庄枯井正处在地震前兆的敏感区域,容易造成局部地带的地下水位上升。第二,作为地震前兆的地层移动,导致地下水位上升,是突变性质的,容易造成局部地带的地下气体突然压缩成高压状态,这就很自然地能解释枯井下高压喷流的形成。第三,经过北京地震队的放射性试验,发现枯井冒出的气体中含有氡,这就进一步证明这种气体确实来自地下较深的部位,并不是由雨水渗透造成的。

根据上面的分析,可以认为,万泉庄枯井的发声,确实有作为地震前兆的价值。应该认真总结这个枯井的各种规律,其中包括发声规律在内,作为以后地震预报的依据之一,即作为地震前兆之一来加以考虑。

五、小 结

从上面的讨论,我们可以对万泉庄枯井发声同地震的关系,得出几点结论:

枯井的声响,就其本质讲是一种喷气声,它的声谱曲线具有喷气声的一切特性。不过,这种喷气声又与枯井上部的圆柱腔发生了纵向共振,使声谱的主峰更为突出,并使声强显著增强。共振效应对枯井发声有

(上接第 270 页)

到激光探癌、治癌等方面都得到广泛应用。在基础研究中,例如在细胞学的研究和生命起源的研究方面,它都是强有力的工具。

近期北京市工农兵医院和西苑中医研究院应用上述氮分子激光器装置治疗耳鼻喉科和皮肤科中的疑难症、多发病,对不同情况得到不同程度的明显疗效。例如:北京市工农兵医院用氮分子激光治疗慢性咽炎,慢性咽炎在耳鼻喉科里是常见病之一,由于病因复杂,病程顽固,至今没有满意的治疗方法,许多患者久治不愈,应用氮激光治疗,使紫外激光直接照射咽部,取单次脉冲输出能量为 0.3—0.4 毫焦耳,重复频率 5 次/秒,每次照射 5 分钟,连续 5 次是一个疗程,不给其它任何药物或治疗,经激光治疗后,在慢性咽炎 58 例患

表 1 氮分子激光治疗慢性咽炎有效率

效 果 例 数	效 果			总 计
	痊 愈	好 转	无 效	
人 数	14	27	17	58
百分率	24%	47%	29%	100%
有效率	71%			

者中,痊愈者 14 例,好转者 27 例,无效者 17 例。有效

重要的作用,这就启示我们,共振现象在地声研究中有广泛应用的可能性。

2、枯井喷气声的成因,是由于地震前在断裂带附近产生了应力变化,使局部地带地下水位突然上升,压缩砂层和砾石层中贮存的气体成高压态,然后以喷流的方式从井口喷出所形成的。要产生这种高压态气体,只有地面下有一层不透气的淤泥层,并且周围又是隔离层的结构才有可能。这就不难理解,为什么其他的枯井不发声而唯独这个枯井发出声响,这是同地下土层的特殊构造有联系的。

3. 枯井的声响,是由于地震前地应力变化、地下水位上升产生的。声响又出现在地震前约 3 至 4 小时,并同地震有很好的相关性,因此,这一类枯井的发声,可以作为捕捉地震前兆的一个重要线索。当然,不一定以后所有的强地震以前都会出现这种前兆,但要是出现了这类前兆,则地震预报部门应该认真加以考虑。而且,在以前的地震观测中,只知道有井水冒泡、发浑、变味等异常现象,但不见有井口喷气发声的记录,这次万泉庄枯井发声还是地震预报工作中碰到的一个新的现象,所以这一现象应该作为新的地震前兆加以重视。

4. 枯井声响是由于地震前地层变化间接产生的,不同于地震前地层变化直接产生的所谓“地声”。地声的研究还应该开拓新的领域,特别应该观测地层应力变化直接引起的声响。

率达 71%(见表 1)。

氮分子激光对慢性咽炎有一定的疗效,其作用机制较复杂。估计用紫外激光照射后具有脱敏作用,因此,对变态反应性疾病起到一定的治疗作用。而且在紫外激光照射后,可使中枢神经系统的活动功能加强,人体代谢功能提高,网状内皮系统功能加强,使人体对某毒素的抵抗力及组织的防御能力提高,增强体质,防止疾病。但究竟机制如何,尚须继续探讨。在治疗急性扁桃腺炎和耳科湿疹亦有明显疗效。皮肤科中对湿疹、皮炎、皮肤溃疡、硬皮病等均得到不同程度的明显疗效。目前,氮分子激光器在医学方面的应用实验还是初步的,有待今后进一步研究探讨。

参 考 文 献

- [1] Godowd, B., *IEEE. J. QE.*, 10(1974), 147.
- [2] Ali, A. W, Kolb, A. C., Andason, A. D., *Appl. opt.*, 6(1967), 2115.
- [3] Basting, D., Schäfer, F. P., Stoyer, B., *Opt-Electronics*, 4 (1972), 43.
- [4] Fitzsimmons, W. A., Anderson, L. W., Ried Hauser, C. E, Vrtilix, J. M., *IEEE, J, Q E* 12 (1976), 625.
- [5] SCHWAB, A. J., Hollinger, F. W., *IEEE, J. QE* 12 (1976), 183.